

# Universidad Politécnica de Cartagena

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

HORMIGÓN LIGERO CON NANOSÍLICE Y ÁRIDOS DE  
PLÁSTICO Y CORCHO RECICLADOS

TESIS PRESENTADA POR EVA MARÍA SÁNCHEZ GARCÍA

2019

Director: Carlos José Parra Costa

Departamento de Arquitectura y Tecnología de la Edificación







**CONFORMIDAD DE SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN DE DEPÓSITO DE  
TESIS DOCTORAL POR EL/LA DIRECTOR/A DE LA TESIS**

D. Carlos José Parra Costa Director/a de la Tesis doctoral: “Hormigón ligero con nanosílice y áridos de plástico y corcho reciclados”

**INFORMA:**

Que la referida Tesis Doctoral, ha sido realizada por D<sup>a</sup>. Eva María Sánchez García, dentro del Programa de Doctorado Tecnología y modelización en ingeniería Civil, Minera y Ambiental dando mi conformidad para que sea presentada ante el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado para ser autorizado su depósito.

La rama de conocimiento en la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- ☐ Ciencias
- ☐ Ciencias Sociales y Jurídicas
- ☒ Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 18 de Nov de 2019

EL DIRECTOR/A DE LA TESIS



Fdo.: Carlos José Parra Costa

**COMITÉ DE DIRECCIÓN ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO**





**CONFORMIDAD DE DEPÓSITO DE TESIS DOCTORAL**  
**POR LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA**

D. Ángel Faz Cano, Presidente de la Comisión Académica del Programa Tecnología y modelización en ingeniería Civil, Minera y Ambiental.

**INFORMA:**

Que la Tesis Doctoral titulada, "Hormigón ligero con nanosílice y áridos de plástico y corcho reciclados", ha sido realizada, dentro del mencionado Programa de Doctorado, por D<sup>a</sup>. Eva María Sánchez García, bajo la dirección y supervisión del Dr. Carlos José Parra Costa.

En reunión de la Comisión Académica, visto que en la misma se acreditan los indicios de calidad correspondientes y la autorización del director de la misma, se acordó dar la conformidad, con la finalidad de que sea autorizado su depósito por el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado.

La Rama de conocimiento por la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- ☐ Ciencias
- ☐ Ciencias Sociales y Jurídicas
- ☒ Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 18 de Mayo de 2019

EL PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA

Fdo: Ángel Faz Cano

**COMITÉ DE DIRECCIÓN ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO**



## **AGRADECIMIENTOS**

Muchas son las personas que han contribuido a que este trabajo haya sido posible, algo tan arduo como el desarrollo de una tesis doctoral no habría podido hacerse sin la ayuda de tantas personas que, de una manera concreta y práctica, o demostrando su interés, cercanía y apoyo moral, lo han hecho posible.

Por ello, quiero expresar mi profundo agradecimiento a:

En primer lugar, al Profesor Doctor Carlos José Parra Costa, que ha dirigido esta tesis. Por su confianza, experiencia, correcciones y consejos. Durante años creyó posible este proyecto y sin su apoyo nunca habría sido realidad.

A Cementos la Cruz S.L., que aportaron materiales e instalaciones sin los que la investigación no habría sido posible. En especial a Pilar Hidalgo que creyó en el proyecto y lo apoyó con su trabajo.

Al Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial, E.P.E: (CDTI-E.P.E.), entidad dependiente del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, que ha financiado la investigación.

Al Grupo de investigación de Ciencia y Tecnología Avanzada de Construcción. A la Dra. Isabel Miñano y el Dr. Francisco Benito, por su tiempo y su trabajo.

A la Universidad Politécnica de Cartagena, especialmente a la Escuela Superior de Arquitectura, que, a través de su personal, puso a nuestra disposición sus recursos e instalaciones. Doy las gracias a Gabriel A. Ros, quien dedicó, de forma desinteresada, tiempo y esfuerzo a este trabajo.

Al Centro Tecnológico de la Construcción de la Región de Murcia (CTCON-RM), en especial a Carlos Rodríguez, por su ayuda durante la campaña de ensayos.

A la empresa BASF, que proporcionó los aditivos, en especial a Francisco J. López Alacid, que no dudó en implicarse durante las pruebas industriales.

Y por encima de todo, gracias a los míos; Maripe, Diego, Clara y Jaime, por estar ahí, siempre.



## RESUMEN

El objetivo de la investigación es elaborar un hormigón ligero, con resistencia suficiente para un uso estructural, sustituyendo áridos tradicionales por áridos ligeros reciclados. Con ello se busca dar solución al problema medioambiental de determinados desechos difíciles de tratar, así como elaborar hormigón ligero muy recomendado en zonas con riesgo sísmico.

Para ello se analizó el estado del arte de los hormigones ligeros y con base en ello se recopiló una serie de áridos y adiciones susceptibles de ser utilizados, se fabricaron mezclas y se les realizaron pruebas de resistencia.

Tras esta fase se seleccionaron cuatro mezclas, dos de referencia y dos de hormigón ligero. Las dosificaciones de referencia con alto contenido de cemento (550 y 700 kg/m<sup>3</sup> respectivamente), Nanosílice, cenizas volantes, superplastificante y áridos tradicionales (arena y grava). Estas muestras fueron de alto rendimiento, alcanzando una resistencia de 100 MPa a los 90 días. Las otras dos mezclas fueron idénticas, pero reemplazando el 48% de la arena y grava con áridos ligeros reciclados (30% de polipropileno, 18,5% de corcho).

Para estimar su resistencia y durabilidad, se analizaron la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, la porosimetría de intrusión de mercurio, la carbonatación, el ataque por cloruros y la penetración de agua a presión.

La resistencia a la compresión y la densidad de las mezclas ligeras se redujeron 68% y 19% respectivamente; sin embargo, ambos retuvieron niveles válidos para uso estructural (más de 30 MPa a 90 días). Los resultados, como la porosidad total entre 9.83% y 17.75% o la penetración de ion cloruro entre 8.6 y 5.9 mm, sugieren que la durabilidad de estos hormigones, incluidos los ligeros, es muy alta gracias a una porosidad muy baja y alta resistencia a los ataques químicos.





**ABSTRACT**

The objective of the research is to produce lightweight concrete, with enough strength to be used as a structural material, replacing traditional aggregates with lightweight recycled materials.

The aim is to solve the environmental problem of certain waste that is difficult to treat, as well as to make lightweight concrete highly recommended in areas with seismic risk.

To do this, the state of the art of lightweight concretes was analyzed and based on this, a series of aggregates and additions capable of being used were collected, mixtures were made, and resistance tests were carried out.

After this phase, four mixtures were selected, two references and two lightweight concrete. The first two-specimen had high cement content (550 and 700 kg/m<sup>3</sup> respectively), Nanosilica, fly ash and superplasticizer. These samples were high performance, reaching a strength of 100MPa at 90 days. The other two mixtures were identical but replaced 48% of the aggregates with recycled lightweight aggregates (30% polypropylene, 18,5% cork).

To estimate its strength and durability, compression strength, elasticity modulus, mercury intrusion porosimetry, carbonation, attack by chlorides and penetration of water under pressure were analyzed.

The compression strength and density of the lightweight mixtures were reduced 68% and 19% respectively; nonetheless, both retained valid levels for structural use (over 30MPa at 90 days). Results, such as the total porosity between 9.83% and 17.75% or the chloride ion penetration between 8.6 and 5.9mm, suggest that the durability of these concretes, including the lightweight ones, is bound to be very high thanks to a very low porosity and high resistance to chemical attacks.



**Contenido**

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>17</b>
<b>1A.</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
<b>1B.</b>	<b>ÁMBITO GENERAL DEL PROYECTO.....</b>	<b>18</b>
<b>1C.</b>	<b>ESTRUCTURA DE LA TESIS .....</b>	<b>21</b>
<b>2.</b>	<b>ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>23</b>
<b>2A.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>23</b>
<b>2B.</b>	<b>COMPONENTES .....</b>	<b>24</b>
2B1.	CEMENTOS Y ADICIONES.....	26
2B1A.	CEMENTO .....	26
2B1B.	ADICIONES .....	27
2B1C.	PUZOLANAS.....	33
2B2.	ÁRIDOS LIGEROS (LWA) .....	34
2B2A.	ÁRIDOS NATURALES. ....	35
2B2B.	ÁRIDOS NATURALES MODIFICADOS .....	35
2B2C.	ARTIFICIALES CREADOS PARA SU FUNCIÓN DE LWA .....	35
2B2D.	LWA PROVENIENTES DEL RECICLADO .....	36
2B2E.	SUSTITUTIVOS DE ÁRIDO .....	44
2B2F.	CONCLUSIÓN .....	44
2B3.	ADITIVOS .....	45
2B3A.	SUPERPLASTIFICANTE (SP) .....	46
2B3B.	INCORPORADORES DE AIRE .....	48
2B4.	FIBRAS .....	51
2B5.	AGUA.....	53
<b>2C.</b>	<b>DOSIFICACIONES .....</b>	<b>54</b>
<b>2D.</b>	<b>PROPIEDADES. ....</b>	<b>54</b>
2D1.	PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO.....	54
2D1A.	CALOR DE HIDRATACIÓN .....	54
2D1B.	CONDICIONES DEL CURADO .....	55
2D2.	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN FRAGUADO .....	58
2D2A.	RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	58
2D2B.	RESISTENCIA A TRACCIÓN .....	65
2D2C.	MÓDULO DE ELASTICIDAD .....	67
2D3.	ESTABILIDAD DIMENSIONAL.....	73
2D3A.	RETRACCIÓN DEL HORMIGÓN .....	73
2D4.	DURABILIDAD .....	77
2D4A.	POROSIDAD .....	82
2D4B.	ATAQUES QUÍMICOS.....	87
<b>3.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>95</b>

<b>3A. INTRODUCCIÓN</b>	95
<b>3B. FASE I</b>	96
<b>3C. FASE II</b>	98
<b>3D. FASE III</b>	101
<b>3E. FASE IV</b>	103
<b>3F. FASE V</b>	104
<b>4. MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS</b>	<b>105</b>
<b>4A. INTRODUCCIÓN</b>	105
<b>4B. MATERIALES COMPONENTES DE MORTEROS Y HORMIGONES</b>	106
4B1. CEMENTO	106
4B2. ADICIONES Y ADITIVOS	111
4B2A. CENIZA VOLANTE (CV)	112
4B2B. HUMO DE SÍLICE (HS)	117
4B2C. LODOS DE PAPEL SIN CALCINAR Y CALCINADOS	122
4B2D. NANOSÍLICE (Ns)	130
4B2E. SUPERPLASTIFICANTE	132
4B2F. ANÁLISIS COMPARADOS	133
4B3. ÁRIDOS	136
4B3A. NEUMÁTICOS FUERA DE USO TRITURADO	136
4B3B. RESIDUOS PLÁSTICOS PROVENIENTES DEL RECICLAJE	139
4B3C. CORCHO TRITURADO RECUPERADO	144
4B3D. ANÁLISIS COMPARADOS DE LOS LWA	147
4B3E. ARENA CALIZA TIPO A	153
4B3F. ARENA CALIZA TIPO B	153
4B3G. GRAVA	155
4B4. FIBRAS	157
4B4A. FIBRAS DE ESPARTO	157
4B4B. FIBRAS DE POLIVINILO	158
<b>4C. PROCEDIMIENTOS</b>	160
4C1. RESISTENCIA MECÁNICA	160
4C1A. COMPRESIÓN	160
4C1B. TRACCIÓN	162
4C1C. MÓDULO DE ELASTICIDAD	164
4C1D. FLEXIÓN	166
4C2. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO	166
4C2A. ESTABILIDAD DIMENSIONAL	168
4C2C. RETRACCIÓN	170
4C3. ENSAYOS DE DURABILIDAD	170
4C3A. POROSIMETRÍA POR INTRUSIÓN DE MERCURIO (PIM)	170
4C3B. ABSORCIÓN DE AGUA POR CAPILARIDAD	171
4C3C. PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE AGUA A PRESIÓN	172
4C3D. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN ACELERADA	173
4C3E. INTERFAZ ÁRIDO-PASTA	173
4C3F. PENETRACIÓN DE IONES CLORURO ACELERADA	173

<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>175</b>
<b>5A. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>175</b>
<b>5B. RESULTADOS FASE II .....</b>	<b>176</b>
5B1. DISCUSIÓN RESULTADOS FASE II.....	178
<b>5C. RESULTADOS FASE III .....</b>	<b>181</b>
<b>5D. RESULTADOS FASE IV.....</b>	<b>181</b>
<b>5E. RESULTADOS FASE V.....</b>	<b>184</b>
5E1. RESULTADOS ENSAYOS RESISTENCIA MECÁNICA .....	184
5E2. DISCUSIÓN RESULTADOS ENSAYOS RESISTENCIA MECÁNICA .....	185
5E2A. COMPRESIÓN .....	185
5E2B. DENSIDAD .....	189
5E2C. MÓDULO ELÁSTICO .....	191
5E2D. TRACCIÓN INDIRECTA .....	193
5E3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS ENSAYOS DE ESTABILIDAD DIMENSIONAL .....	195
5E3A. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS HORMIGONES DURANTE EL FRAGUADO.....	195
5E3B. RETRACCIÓN .....	196
5E4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS ENSAYOS DE DURABILIDAD .....	198
5E4A. POROSIMETRÍA POR INTRUSIÓN DE MERCURIO (PIM) .....	198
5E4B. ABSORCIÓN DE AGUA POR CAPILARIDAD .....	200
5E4C. PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE AGUA A PRESIÓN .....	204
5E4D. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN ACELERADA.....	208
5E4E. PENETRACIÓN DE IONES CLORURO ACELERADA.....	212
5E4F. INTERFAZ ÁRIDO-PASTA.....	213
5E4G. RESUMEN DURABILIDAD.....	214
<b>6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>215</b>
<b>6A. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>215</b>
<b>6B. CONCLUSIONES.....</b>	<b>216</b>
<b>6C. TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>217</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>218</b>
<b>ANEXO I. LISTADO DE FIGURAS, TABLAS E IMÁGENES .....</b>	<b>227</b>
<b>ANEXO II. PRUEBAS INDUSTRIALES.....</b>	<b>235</b>



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1A. OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo es obtener el título de Doctora en el programa de doctorado de Tecnología y modelización en ingeniería Civil, Minera y Ambiental de la Escuela internacional de doctorado (EINDOC) de la Universidad politécnica de Cartagena (UPCT). Este trabajo está realizado por Eva M<sup>a</sup> Sánchez García y dirigido por Carlos José Parra Costa

Esta Tesis se titula " Hormigón ligero con nanosílice y áridos de plástico y corcho reciclados" y trata sobre el diseño de hormigón reutilizando determinados subproductos de la industria y con un peso reducido, con el fin de obtener un hormigón estructural más ligero y sostenible que el hormigón tradicional (NC por la abreviación del inglés "Normal Concrete").

Este proyecto se ha realizado con la financiación del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, en el marco de un proyecto CDETI, con referencia IDI-20141102, en el que han participado el Grupo de Investigación de Ciencia y Tecnología Avanzada de Construcción, de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura y Edificación de la Universidad Politécnica de Cartagena y la empresa Cementos La Cruz S.L., habiendo concluido con éxito ya esta fase.

## 1B. ÁMBITO GENERAL DEL PROYECTO

El término eco-eficiencia fue acuñado por el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) en su publicación del año 1992 "Changing Course" [2]. Está basado en el concepto de crear más bienes y servicios utilizando menos recursos y creando menos basura y polución.

De acuerdo con la definición del WBCSD, la eco-eficiencia se alcanza mediante la distribución de "bienes con precios competitivos y servicios que satisfagan las necesidades humanas y brinden calidad de vida a la vez que reduzcan progresivamente los impactos medioambientales de bienes y la intensidad de recursos a través del ciclo de vida entero a un nivel al menos en línea con la capacidad estimada de llevarla por la Tierra."

De acuerdo con el WBCSD, los aspectos críticos de la ecoeficiencia son:

- Una reducción en la intensidad material de bienes y servicios;
- Una reducción en la intensidad energética de bienes y servicios;
- Dispersión reducida de materiales tóxicos;
- Reciclabilidad mejorada;
- Máximo uso de recursos renovables;
- Mayor durabilidad de productos;
- Intensidad de servicio aumenta de los bienes y servicios.

La reducción en impactos ecológicos se traduce en un incremento en la productividad de los recursos, que además puede crear una ventaja competitiva.

El hormigón es el material de construcción más utilizado en la tierra, actualmente alrededor de 10km<sup>3</sup>/año [3, 4]. Comparando, la cantidad de piezas cerámicas (ladrillos en su mayor parte), madera y acero utilizados en la construcción, representan respectivamente alrededor de 2, 1.3 y 0.1km<sup>3</sup>/año [5]. El 80% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera en la producción de hormigón lo causa la fabricación de cemento y la industria cementera emite cerca de dos mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> lo que supone entre un 8% del total de emisiones mundiales [6, 7].

Por otra parte, hormigón ligero, (en lo siguiente LWC por la abreviación del inglés "lightweight concrete") es aquel que tiene una densidad inferior a 2000Kg/m<sup>3</sup>, esto supone una reducción considerable de su peso propio lo que permite, por un lado, reducir el espesor de las estructuras (lo que lo hace indicado para zonas con riesgo sísmico) y por otro, al ser menos cantidad de material más ligero, reducir los costes de transporte.

Para reducir la densidad del hormigón, el método más común es la sustitución, total o parcial, de los áridos tradicionales (arena y grava) por otros de menor densidad. De entre ellos, los áridos ligeros (LWA por lightweight aggregate) más utilizados son, la piedra pómez ([8-14]), la arcilla expandida ([1, 15-25]) y los áridos artificiales de cenizas volantes ([26-31], todos ellos de uso muy extendido dado su buen comportamiento en resistencia y durabilidad. Sin embargo, la lista de materiales



utilizados como LWA es extensa aunque se pueden agrupar en dos familias, los áridos naturales como la diatomita [32], la caliza triturada [13, 33] o la escoria volcánica [34], y los áridos reciclados, como los plásticos [35-46], el corcho desechado [47-49] o la cáscara de la palma para aceite [50, 51], neumáticos triturados [52, 53].

De entre ellos, el plástico tiene una especial importancia. Debido a su elasticidad y flexibilidad, así como a los reducidos costes de producción, se ha convertido en uno de los materiales más utilizados en el planeta. Por el contrario, su durabilidad lo convierte en un problema ambiental al convertirse en material de desecho. El polipropileno (PP) es uno de los plásticos más utilizados, en España representa el 22% del plástico total según el Centro Español de Plásticos [54] y, sin embargo, a pesar de la cantidad de literatura sobre áridos de plástico reciclado, [33, 45, 55-59], se ha encontrado muy poco sobre PP ya que la mayoría de los estudios publicados usan PET o espuma de poliuretano, [44, 60-62]. Los porcentajes de sustitución, en volumen, más utilizados, varían entre 15 y 50%, y la resistencia que se logra entre 10 y 50MPa [44, 45]. La principal razón por la que los áridos plásticos no consiguen la resistencia de los tradicionales es el comportamiento de la zona interfacial árido-pasta (ITZ). Numerosos estudios han analizado la ITZ de los áridos de plástico [35-46] y existe consenso en que el vínculo entre el cemento y el árido de plástico es más débil que el de los áridos tradicionales. Esto se debe a que el plástico es un material hidrofóbico lo que impide la beneficiosa lenta hidratación que provoca el agua absorbida por los áridos porosos durante el fraguado, además, esta agua no absorbida, en su camino al exterior deja poros que pueden comprometer la durabilidad. La forma de LWA plástico también influye en la ITZ con lo que Ben Fraj, Kismi y Mounanga [61] llaman “efecto pared”; esto es, que al ser liso y redondeado afecta negativamente a la interfaz.

Para evitar estos efectos, algunos investigadores aplican técnicas, como un tratamiento previo con hidróxido de sodio, [38], uso de plástico en forma de espuma, [41, 61], árido de plástico con escoria de altos hornos adherida en la superficie [63], o mezclado con arena [62].

El plástico reciclado usado como LWA en este trabajo, no reduce la densidad sustancialmente, es necesario combinarlo con otro material de muy baja densidad, tal como el corcho desechado por la industria agrícola.

El corcho es un tejido vegetal que se obtiene al extraer la corteza del alcornoque (*quercus suber* L.). Tiene una estructura particular que le confiere una baja densidad, entre 140 y 200kg/m<sup>3</sup> y resistencia a la compresión por encima de 90MPa [64]. La industria del corcho ocupa un área forestal de 22,000 km<sup>2</sup> y produce, al año, 340,000 toneladas [65], de los cuales se estima que se descartan entre 68,000 y 85,000 toneladas [66]. Los estudios sobre corcho como LWA obtienen densidades muy bajas, entre 1000 y 2000kg/m<sup>3</sup>, con porcentajes de sustitución de entre 2 y 18%, sin embargo, la resistencia también se reduce, por debajo de 20MPa. [47-49], también es interesante su capacidad para absorber energía, resistencia al impacto, así como su comportamiento como aislante térmico y acústico.

El plástico y el corcho sustituyendo una proporción de los áridos tradicionales, consiguen reducir la densidad del hormigón, pero debido a los problemas en la ITZ, no alcanzan resistencias ni durabilidad altas. La resistencia baja se puede compensar con adiciones que mejoran los puntos débiles, en este sentido, para mejorar la ITZ, se ha verificado la validez del uso de nanosílice (Ns) como adición [67] elevando así, entre otras cosas, la resistencia del hormigón [68, 69].



Imagen 1 – Polipropileno (Izda.) y Corcho (Drcha.) utilizados para la investigación

El Ns coloidal es un núcleo de dióxido de silicio amorfo con una superficie hidroxilada. Tiene una gran área de superficie en relación con su volumen, lo que la hace químicamente muy reactiva, es decir, con propiedades puzolánicas, ya que reacciona con cristales de hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) presente en el ITZ, produciendo silicato de calcio hidratado (CSH gel). Esta reacción hace que la cantidad de cristales de hidróxido de calcio disminuya y la resistencia inicial de la pasta de cemento aumente [70]. El otro nivel en el que el Ns funciona es en el nivel físico, el micro silicio es 100 veces más pequeño que el cemento, por lo tanto puede ocupar las pequeñas cavidades que dejan las partículas de cemento parcialmente hidratadas, [71] esto supone un aumento de la densidad y una reducción de la porosidad. Las concentraciones en que se usa están entre 0.5 y 10%, ya que en altas concentraciones aumenta la retracción autógena por la desecación, y se debe tener extremo cuidado durante el curado [71], así como también usar superplastificante (SP) y aumentar la cantidad de agua [72, 73].

Con el objetivo de mejorar con adiciones las prestaciones del hormigón, Pera y Amrouz [74] estudiaron el uso de lodos de papel calcinado y detectaron en ellos una alta actividad puzolánica; varios autores han analizado su capacidad como adición cementante con resultados positivos [75-77].

Este trabajo presenta dos dosificaciones de LWC, ambas sustituyendo el 48% en volumen, del árido tradicional, de las cuales el 29.5% es sustituyendo por PP reciclado de plástico y el 18.5% por corcho, para mejorar tanto la resistencia como la durabilidad, se usa el 2% del peso del cemento de Ns, y la cantidad de cemento se varía para elevar la resistencia tanto como sea posible. También se realizaron dos dosificaciones equivalentes sin LWA, pero con el mismo contenido de cemento, Cenizas volantes (CV), agua y Ns para analizar los comportamientos que se producen debido al uso de LWA reciclado. La relación agua/material cementante

(a/cm) utilizada fue del 0,25. El objetivo del trabajo es estudiar LWC con áridos reciclados capaces de reemplazar el NC en las estructuras de los edificios, por lo que no se usaron medios especiales para mezclar o curar, y se evitaron las consistencias excesivamente secas.



Imagen 2 – Probetas pulidas de NC (Izda.) y LWC (Drcha.)

Para conocer la validez de las mezclas diseñadas, se realizaron varias pruebas a los hormigones. En cuanto al comportamiento mecánico, se estudió la compresión y la resistencia a la tracción, y el módulo de elasticidad. Su microestructura fue analizada a través de la porosimetría de intrusión de mercurio (PIM) y la retracción total para verificar que la cantidad de cemento utilizado, además del  $N_s$ , no causa una retracción excesiva.

### 1C. ESTRUCTURA DE LA TESIS

Se plantea un esquema del trabajo en seis capítulos.

El capítulo 1 es una introducción de la tesis que marca los objetivos, sitúa en antecedentes y resume la estructura del trabajo. El capítulo 2 Aporta una revisión de la literatura especializada en lo que, a la investigación afecta, se estudian los principales materiales utilizados en la actualidad para fabricar LWC, y el actual uso de aditivos que mejoran el comportamiento del NC. El capítulo 3 detalla el proyecto experimental. El capítulo 4 describe los materiales utilizados en la investigación y los procedimientos empleados. El capítulo 5 proporciona los resultados de los ensayos además de una discusión detallada de los mismos. En el capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo. A continuación, se encuentra la bibliografía y anexos de interés.



**2. ESTADO DEL ARTE****2A. INTRODUCCIÓN**

En la literatura científica el LWC ha sido un tema recurrente a lo largo de los años continuando en auge debido al interés que suscita, tanto la sostenibilidad como el uso estructural en zonas sísmicas [78-84]. Su complejidad y por lo que sigue motivando estudios es la elevada cantidad materiales que pueden ser utilizados como LWA en muchos de los casos con buenos resultados que no hacen sino propiciar investigaciones para caracterizar cada nuevo componente.

En el presente capítulo se tratará de dar una visión general al mapa actual del LWC dando especial interés a los componentes del hormigón que se desarrolla en el presente trabajo, así como aportar información sobre los valores obtenidos por la comunidad científica, en hormigones similares a los del trabajo en los ensayos de resistencia y durabilidad de uso más extendido.

## 2B. COMPONENTES

Las principales líneas de investigación sobre el LWC se concentran en:

- El reciclaje de subproductos de la industria para su uso como LWA; por ejemplo, poliuretano expandido proveniente de demoliciones, cáscaras de palma de aceite, lodos de depuradoras para base de áridos expandidos, etc.[33, 50, 51]
- La mejora de las prestaciones del LWC; conseguir más altas resistencias a la compresión o mayor obstrucción a los ataques que reducen la durabilidad del hormigón. [9, 15, 16].

El primer grupo de líneas de investigación genera multitud de áridos, pero, en la segunda destacan tres; la pumita o piedra pómez, la arcilla expandida y los áridos artificiales de cenizas volantes (AACV).

Analizando numerosos artículos sobre la materia [1, 8-10, 13-34, 50, 51, 56, 61, 85-101] se confecciona la gráfica de la **Figura 1** que trata dos aspectos claves del LWC, resistencia a compresión y densidad.

Aunque la nube de puntos presenta elevada dispersión sí que existe una clara tendencia en la relación entre densidad y resistencia. Se pueden diferenciar dos zonas; la de los LWC propiamente dichos (por encima de los 15MPa), que raramente tienen densidad inferior a los 1500 kg/m<sup>3</sup>, y los de resistencia más reducida (inferior a los 15MPa), con densidades muy bajas. Los primeros, con densidad más alta, suelen utilizar LWA comunes (pumita, arcilla expandida y AACV), que están más desarrollados técnicamente, y cuyo fin suele ser, como ya se ha comentado, estructural.

Los de densidades más bajas suelen contener áridos más experimentales, generalmente provenientes del reciclaje que suponen una solución a determinados materiales que de otra forma constituirían un problema medioambiental (espuma de poliuretano, áridos expandidos de residuos de depuradoras, cáscara de palma para aceite, etc.), además estos LWC, se utilizan como cerramiento debido a su buen comportamiento como aislante térmico y su buen comportamiento ante el fuego.

Como resumen por familias de los tipos de áridos utilizados en los LWC se presenta la **Figura 2**.

La arena común y la grava están entre los áridos más utilizados, esto se debe a que muchos LWA tienen una granulometría muy concreta y sólo pueden actuar como gruesos o como finos o consiguen muy baja resistencia, en estos casos se combinan con los áridos tradicionales.



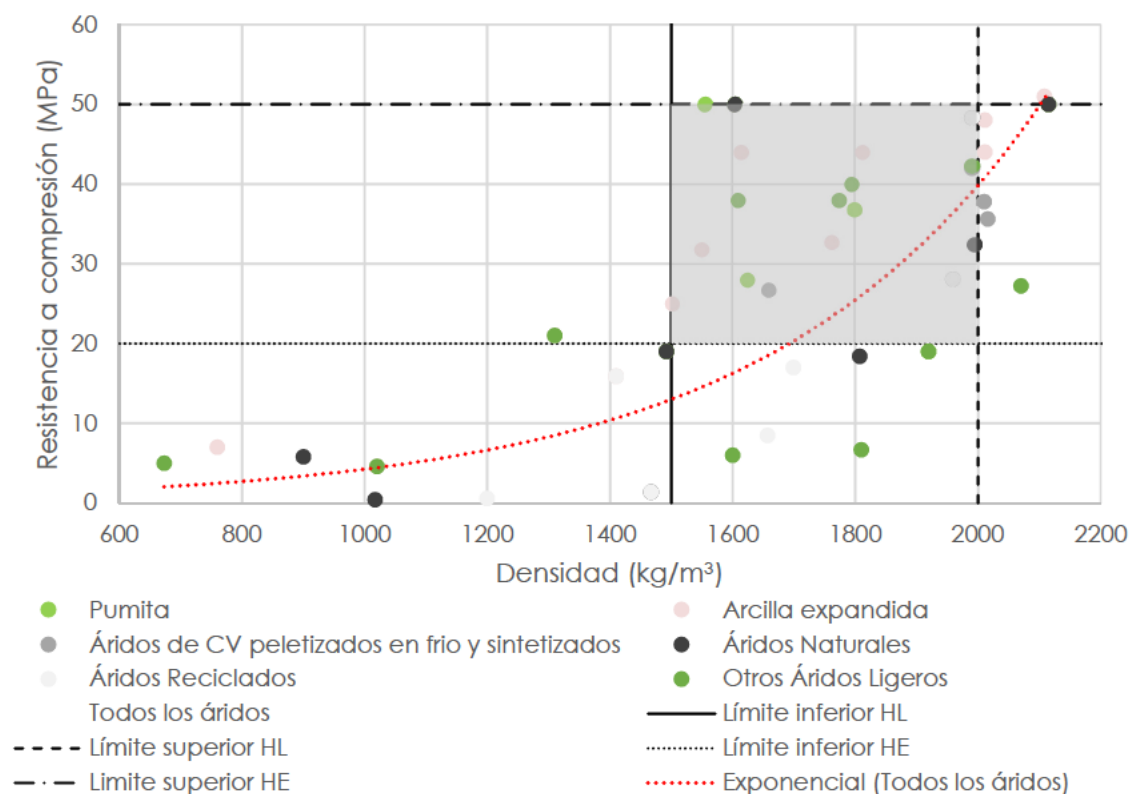


Figura 1 - Relación densidad / Resistencia a compresión de las mezclas seleccionadas

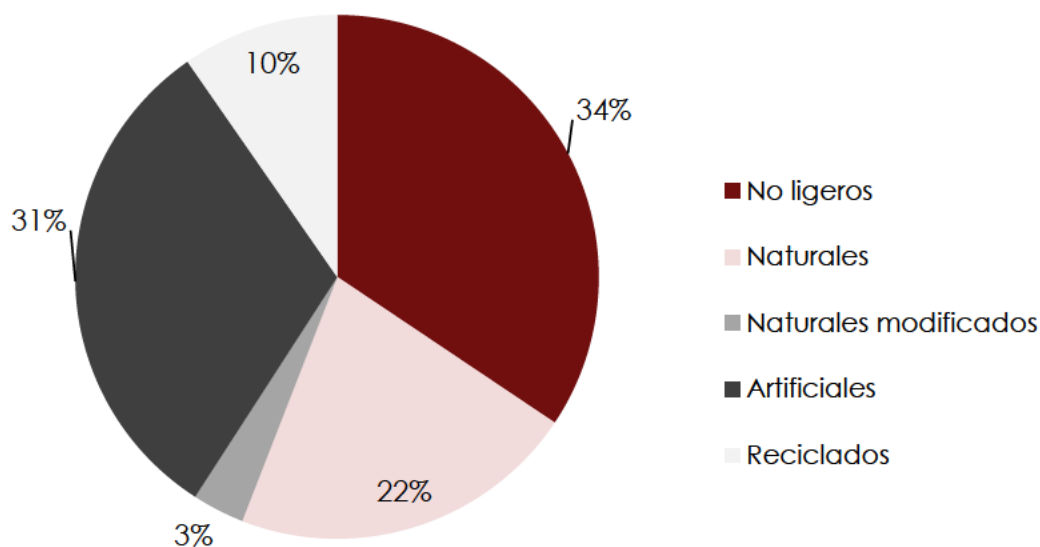


Figura 2- Familias de áridos utilizados en los artículos seleccionados

A continuación, se analizan los componentes más utilizados en la fabricación de LWC destacando los materiales que se utilizarán en las sucesivas fases del estudio.

## 2B1. CEMENTOS Y ADICIONES

Durante la revolución industrial, a principios del siglo XIX, en Inglaterra los núcleos urbanos crecían rápidamente y la necesidad de materiales pétreos que se manejaran de manera fácil y que fraguaran en contacto con el agua llevaron a desarrollar el cemento y con él, el hormigón, en 1824 Joseph Aspdin patenta el cemento Portland [102].

En general se llaman conglomerantes hidráulicos aquellos productos que, amasados con el agua, fraguan y endurecen tanto expuestos al aire como sumergidos en agua, por ser estables en tales condiciones los compuestos resultantes de su hidratación.

En España están regulados por la RC-16 Instrucción para la Recepción de Cementos [103].

### 2B1A. CEMENTO

Su componente básico es el Clinker, (que a su vez se obtiene de calcinar yeso y arcilla), al que se le añaden normalmente adiciones de sulfato de calcio. Reacciona inmediatamente al entrar en contacto con el agua (tiene propiedades hidráulicas). Al necesitar altas temperaturas para su producción (entre 1350 y 1450°C) es un producto considerado dañino para el medio ambiente.

El Clinker al reaccionar con el agua, forma silicatos y aluminatos (hidratos). Los silicatos son; el silicato tricálcico (alita), con fórmula  $\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO}$ , se representa como  $\text{C}_3\text{S}$  y el silicato bicálcico (belita), con fórmula  $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$ , se representa como  $\text{C}_2\text{S}$ . Los aluminatos son el aluminato tricálcico, con fórmula  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$ , representado como  $\text{C}_3\text{A}$  y el ferrito aluminato tetracálcico, con fórmula  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO}$  y representado como  $\text{C}_4\text{AF}$ . Los más abundantes son los silicatos (aproximadamente 51% de alita y 26% de belita) los silicatos se encuentran, aproximadamente, en un 11% y 12% respectivamente.

La alita le confiere la resistencia inicial, alcanzándose a la semana toda su resistencia y desprendiendo una elevada cantidad de calor al hidratarse (120cal/g). La belita tarda alrededor de un año en alcanzar su resistencia máxima y al ser un proceso más lento desprende menos calor que la alita (62 cal/g). Los aluminatos contribuyen poco a la resistencia a la resistencia del cemento, el  $\text{C}_3\text{A}$  tiene una muy rápida hidratación, generando gran cantidad de calor (207 cal/g) y cuando se encuentra en cantidades elevadas, da lugar a aglomerados muy sensibles al ataque por sulfatos. El  $\text{C}_4\text{AF}$  es el responsable del color gris del cemento debido al contenido de óxido de hierro.

Debe estar constituido al menos en dos tercios de su masa por silicatos. La relación en masa  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  no será menor de 2,0 y el contenido de óxido de magnesio (MgO) no excederá del 5,0% en masa.

En la actualidad se ha generalizado el uso de otros compuestos que, siempre mezclándose con el cemento, consiguen reducir su consumo, estos otros materiales por sí mismos no reaccionan con el agua pero en presencia de agua y cemento y



finamente molidos, reaccionan con el hidróxido de calcio disuelto formando compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio capaces de desarrollar resistencia, a estos materiales a veces se les incluye en el grupo de los aditivos y otras como adiciones, en este trabajo se incluirán en el grupo de los conglomerantes por poder desarrollar resistencia al endurecer.

## **2B1B. ADICIONES**

La EHE-08 [104], entiende por adiciones aquellos materiales inorgánicos, puzolánicos o con hidraulicidad latente que, finamente divididos, pueden ser añadidos al hormigón con el fin de mejorar alguna de sus propiedades o conferirle características especiales. La instrucción sólo incluye las CV y el HS. Para ambos se recogen unas prescripciones y ensayos.

La RC-16, [103], sí contempla más tipos de adiciones y las considera como componentes del cemento ya que estas adiciones se pueden incorporar al cemento durante su manufactura. La norma marca que estos elementos cumplirán con los requisitos de la norma UNE-EN 196 [105]

### **2B1B1 CENIZAS VOLANTES (CV)**

Para reducir el uso de cemento, la adición más común son las CV, son residuos de las centrales térmicas que emplean carbón como combustible, producidos durante la combustión de los quemadores. La cantidad de CV en el hormigón puede variar entre el 5 y el 65 % en peso de los materiales cementantes, según la fuente y composición de las CV y las propiedades requeridas para el hormigón. Las características de las CV pueden variar significativamente según la fuente del carbón mineral que se quema.

Las cenizas clase F son normalmente producidas por la quema de la antracita o carbones bituminosos y generalmente contienen un contenido bajo de calcio. Las cenizas clase C son producidas cuando se queman carbones sub-bituminosos y poseen típicamente propiedades puzolánicas. La EHE-08 [104], permite su uso con cemento tipo CEM I y no exceder el 20% del peso del cemento para hormigón pretensado ni el 35% para elementos no pretensados además de cumplir las especificaciones de la UNE-EN 450-1 [106] (contenidos en cloruros, índice de actividad, expansión, etc.), la norma americana que le afecta es la ASTM C618

La RC-16, [103], hace una clasificación entre las CV de naturaleza silíceas o calcáreas. Las primeras tienen propiedades puzolánicas y las segundas pueden tener, además, propiedades hidráulicas.

- La CV silícea es un polvo fino de partículas esféricas con propiedades puzolánicas que consta esencialmente de dióxido de silicio reactivo ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). El resto contiene óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y otros compuestos. La proporción de óxido de calcio reactivo será superior a un 10% en masa. y el contenido de óxido de calcio libre, no excederá del 1% en masa. El contenido de dióxido de silicio reactivo no será inferior al 25% en masa.
- CV calcáreas. Son un polvo fino que tiene propiedades hidráulicas o puzolánicas. Consta esencialmente de óxido de calcio reactivo ( $\text{CaO}$ ), dióxido

de silicio reactivo ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). El resto contiene óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y otros compuestos. La proporción de óxido de calcio reactivo será superior al 10% en masa. Por un lado, si las CV calcáreas contienen entre el 10% y el 15% en masa de óxido de cal reactivo, tendrán un contenido superior o igual al 25% en masa de dióxido de silicio reactivo. por otro lado, cuando tengan más del 15% en masa de óxido de calcio reactivo, tendrán una resistencia a compresión de al menos 10 MPa a 28 días.

#### 2B1B2 HUMO DE SÍLICE (HS)

El HS es un material puzolánico de alta reactividad y es un subproducto de la producción de metal silíceo o ferro-silíceo. Se recolecta de la chimenea de gases de los hornos de arco eléctrico. El HS es un polvo extremadamente fino, con partículas alrededor de 100 veces más pequeñas que un grano promedio de cemento. El HS está disponible como un polvo densificado o en forma de material acuoso. Generalmente se utiliza entre el 5 y el 12 % en peso de los materiales cementantes para las estructuras de hormigón que necesitan alta resistencia o una permeabilidad significativamente reducida al agua. Debido a su extrema finura, deberán garantizarse procedimientos especiales para la manipulación, puesta en obra y fraguado del hormigón con este material. La norma americana que le afecta es la ASTM C1240. La EHE-08 [104], permite su uso con cemento tipo CEM I y no exceder el 10% del peso del cemento para elementos tanto pretensados como no pretensados, además de cumplir las especificaciones de contenidos en cloruros, índice de actividad, expansión, etc.

La RC-16 [103] marca que el contenido en masa de dióxido de silicio amorfo debe ser al menos del 85%

#### 2B1B3 NANOSÍLICE (Ns)

Las nanopartículas son partículas microscópicas con, como máximo, una dimensión de 100 nm y aplicaciones potenciales en diversos campos, biomédicos, ópticos, electrónicos, etc. El desarrollo de nuevas tecnologías para la fabricación de nanopartículas es aplicable para la fabricación de hormigones de altas prestaciones mediante el uso de minerales activos de tamaños nanométricos, estos minerales contribuyen a la mejora tanto de las propiedades mecánicas como la durabilidad.

Las nanopartículas de sílice han incrementado en los últimos años la atención de fabricantes debido a los buenos resultados que produce en la resistencia del hormigón. Se trata de un compuesto sólido de silicio y oxígeno que se obtiene del mineral de olivino ( $(\text{MgFe}_2)\text{SiO}_4$ ) [71].

Las nano-partículas pueden actuar como centros de nucleación para algunas fases de hidratación del cemento, así como nano-refuerzo o nano-filler para densificar la microestructura y la zona de transición entre la pasta y los áridos (ITZ) [67].

En su aspecto como mejora química, el Ns reacciona con los cristales de hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), produciendo silicato cálcico hidratado (gel CSH). Esta reacción provoca que la cantidad de cristales de hidróxido de calcio disminuya y, la resistencia de la pasta de cemento aumente [70].

El otro nivel al que trabaja el Ns es a nivel físico como nano-filler , el micro-silicio es 100 veces menor que el cemento, por lo tanto puede ocupar la pequeñas oquedades que dejan las partículas de cemento parcialmente hidratadas, [71] esto supone un incremento de la densidad y una reducción de la porosidad que a su vez provocan un incremento en la resistencia a compresión y flexión. Se ha observado también que el efecto depende de la naturaleza y método de producción del Ns, ya sea coloidal o polvo seco. Se utiliza en concentraciones entre 0.5 y 10%. En altas concentraciones el calor de hidratación se eleva provocando aumento de la retracción autógena. Para evitar este efecto se deben extremar los cuidados durante el curado, así como utilizar superplastificantes (SP) y aumentar la cantidad de agua. [71-73]. Otro efecto negativo de utilizar Ns en altas concentraciones es la efectividad en su dispersión lo que reduce significativamente sus beneficios debido a la floculación, que puede conducir a la generación de concentraciones de esfuerzos y con ello una disminución en el desempeño mecánico del material [107]

Diversos autores han concluido que, de la relación contenido Ns/resistencia a compresión, se destaca el hecho de que entre el 0 y el 1% de proporción de Ns, la resistencia a compresión se eleva (**Tabla 1**, **Figura 3** y **Figura 4**). A partir del 1% hasta el 2%, hay sólo un caso en el que continúa elevándose, este es el de Nazari, A. y Riahi, S. [108] , para muestras curadas en solución de cal frente a muestras iguales curadas en agua que, como en el resto de casos, la compresión y tracción desciende al sobrepasar el 1% la proporción del Ns. En el caso en el que se adiciona el 3%, el resultado es negativo y desciende más significativamente y en todos los casos. El comportamiento de compresión y flexión es análogo manteniéndose en todos los casos la relación directa entre ambos.

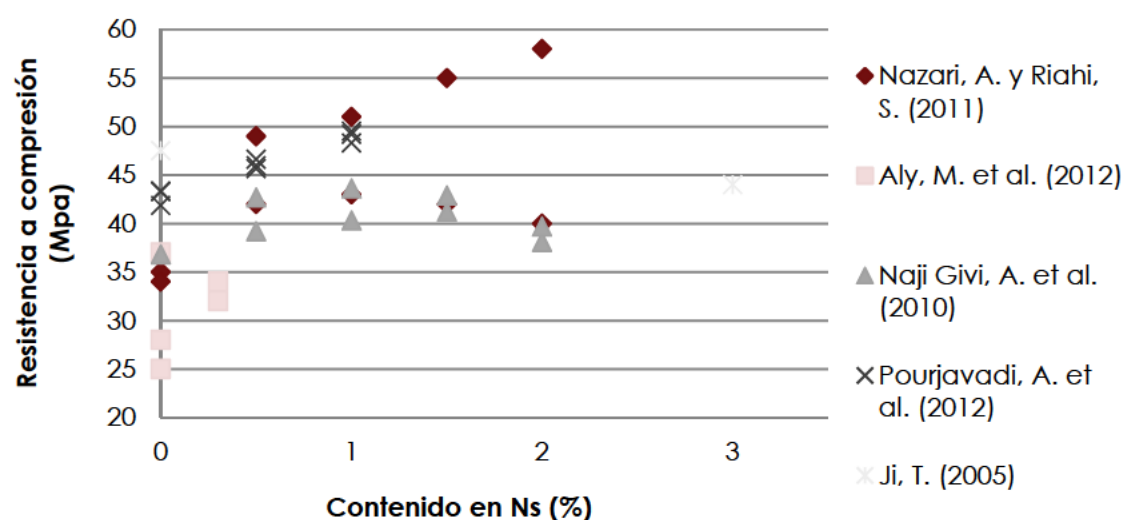


Figura 3- Relación % de Ns - resistencia a compresión de distintos artículos científicos.

Tabla 1 - Materiales y resistencias de las mezclas de distintos artículos científicos

Artículo	Mezcla	Ns (%)	Cem kg/m <sup>3</sup>	Ns (kg/m <sup>3</sup> )	P. vidrio reciclado	Polímer absor (%)	Resist. Comp (MPa)	Resist. Flex (MPa)	Ø Ns
Nazari, A. y Riahi, S. [108]. Curación	C0-W	0	450	0			35		Ns 15nm
	N1-W	0,5	447,75	2,25			42		
	N2-W	1	445,5	4,5			43		
	N3-W	1,5	443,25	6,75			42		

Artículo	Mezcla	Ns (%)	Cem kg/m <sup>3</sup>	Ns (kg/m <sup>3</sup> )	P. vidrio reciclado	Polímer absor (%)	Resist. Comp (MPa)	Resist. Flex (MPa)	Ø Ns
en agua	N4-W	2	441	9			40		
Nazari, A. y Riahi, S. [108]. Curación en solución de cal	C0-LW	0	450	0			34		
	N1-LW	0,5	447,75	2,25			49		
	N2-LW	1	445,75	4,5			51		
	N3-LW	1,5	443,25	6,75			55		
	N4-LW	2	441	9			58		
Aly, M. et al. [109]	Control	0	450				25	5.8	Ns coloidal 5nm
	WG20	0	360		90		28	7.8	
	WG40	0	270		180		37	7.2	
	CSWG20	0,3	346,5	13,5	90		34	9	
	CSWG40	0,3	256,5	13,5	180		32	8.5	
Givi, A. et al. [110]	C0	0					36,8	4.4	Ns DE 15nm
	CN1	0,5					39,2	4.8	
	CN2	1					40,3	5.1	
	CN3	1,5					41,2	5.4	
	CN4	2					38,1	4.8	Ns DE 80nm
	FN1	0,5					42,7	5.3	
	FN2	1					43,6	5.8	
	FN3	1,5					42,9	5.6	
Pourjavadi, A. et al. [111]	FN4	2					39,7	5	Ns DE 19nm
	Z-0	0				0	43,35	6.5	
	Z-1	0				0,1	43,3	6.2	
	Z-3	0				0,3	41,88	6	
	H-0	0,5				0	46,61	6.7	
	H-1	0,5				0,1	45,96	6.4	
	H-3	0,5				0,3	45,67	6.3	
	O-0	1				0	49,51	7.2	
Ji, T. [70]	O-1	1				0,1	49,18	6.8	Ns DE 15nm
	O-3	1				0,3	48,31	6.6	
	NC	0	389	0			47,5		
	SC	3	370	13,9			44		

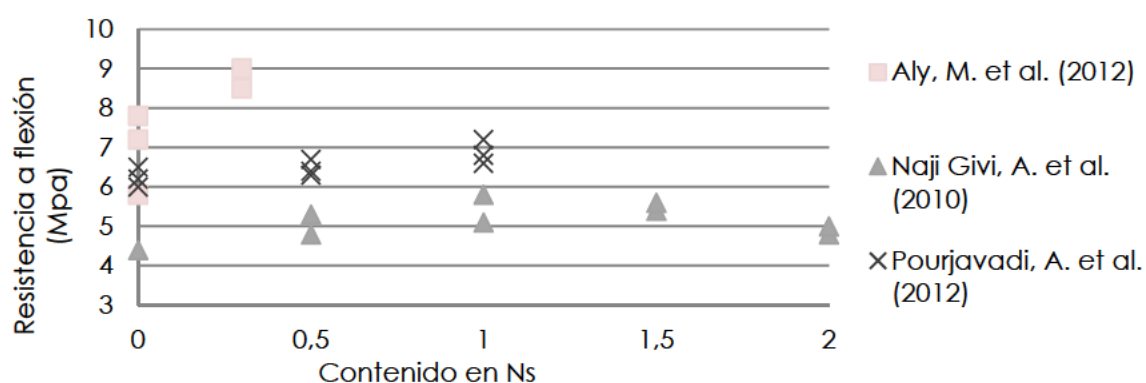


Figura 4- Relación % de Ns - resistencia a flexión de distintos artículos científicos

La subida entre el 0 y el 2% es generalizada e independiente de si se le utiliza algún otro material en la mezcla del hormigón o mortero. El caso del comportamiento entre el 2 y el 3% es diferente ya que en algunos casos desciende y en otros continúa elevándose (Tabla 2).

El hecho que hace que mejore o no parece independiente del tamaño de partículas de Ns, como demuestran Naju Givi, A. et al. [112], si bien, en este caso, el incremento entre el 0 y el 1% es más acusada si las partículas son de 80nm frente al más común de 15nm. Caso diferente es el de Nazari, A. y Riahi, S. [108] en donde, ante diferentes medios de curación, la situación se invierte al elevar la proporción de Ns. Si las mezclas se curan en solución de cal, frente a curación en agua, la resistencia continúa elevándose al elevar la proporción, además de tener resistencias más elevadas a iguales proporciones.

**Tabla 2** - Materiales y resistencias de las mezclas de distintos artículos científicos.

Artículo	mezcla	Densidad (kg/m³)	Ns (%)
Pourjavadi, A. et al. [111]	Z-0	1830	0
	Z-1	1822	0
	Z-3	1806	0
	H-0		0,5
	H-1		0,5
	H-3		0,5
	O-0	1806	1
	O-1	1809	1
	O-3	1785	1
	NC	2418	0
Ji, T. [70]	SC	2400	3

La resistencia a flexión muestra resultados similares a los de la compresión, pero es un dato que se aporta en menos casos por lo que no se extraen conclusiones adicionales a las de la compresión.

## 2B1B4 LODOS DE PAPEL

En la búsqueda de nuevos materiales que permitan reducir la cantidad de cemento, en los últimos años se suma el uso del lodo de papel calcinado.

En la Unión Europea, la industria papelera produce once millones de toneladas de desechos anualmente [113], esto hace que merezca la pena, desde el punto de vista medioambiental, intentar reutilizar estos desechos. Dado que los lodos calcinados presentan una alta actividad puzolánica [74], los hacen interesantes para su uso como adición cementante.

Para este fin, los lodos de papel primero deben ser secados a 105°C durante 24 horas, después debe ser calcinado entre 650 y 750°C durante, de 2 a 5h [74, 76]. Otros estudios utilizan las cenizas resultantes de la calcinación de los lodos en la propia industria papelera, tras pasar por la incineradora de biomasa generadora de electricidad. Los lodos presentan alta actividad puzolánica en los primeros 28 días, si bien esta actividad es inferior a la que se obtiene en el caso del HS, pero muy superior a la de la CV. [75] (**Figura 5**).

Para medir la actividad puzolánica de la Villa et al. [77] realiza un método acelerado, en el que se estudia la reacción del material con una solución saturada de cal en el tiempo. La cal fijada por la muestra (%) se obtiene por diferencia de la



concentración de la solución saturada de cal inicial y el CaO presente en la solución en contacto con la muestra, al final de cada período prefijado.

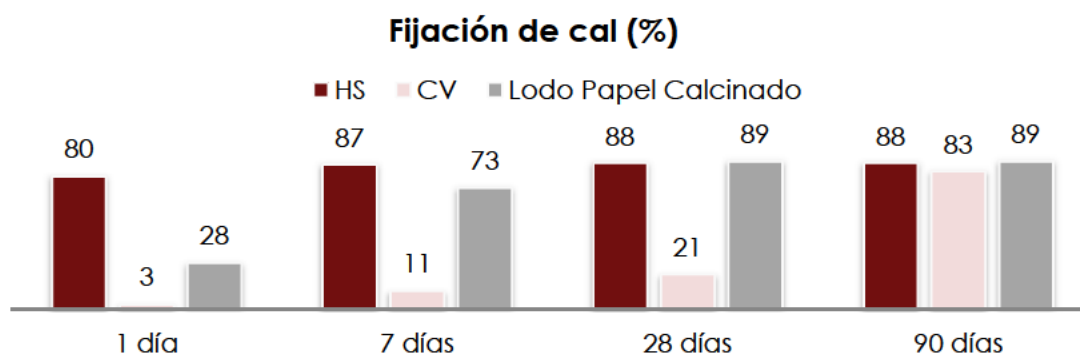


Figura 5- Actividad puzolánica de distintas adiciones [75]

En el estudio de Vegas, et al. [114], se muestra que, en pruebas en morteros de cemento, sustituyendo parcialmente el cemento por los lodos, la resistencia del mortero no muestra grandes cambios e incluso una ligera mejora. Como se observa en la **Figura 6**, las muestras siguen las proporciones, para las mezclas de la UNE EN 196 y sustituyen el cemento (CEM I 52.5N) en distintos porcentajes en masa por lodo de papel calcinado a 650°C durante 2 horas.

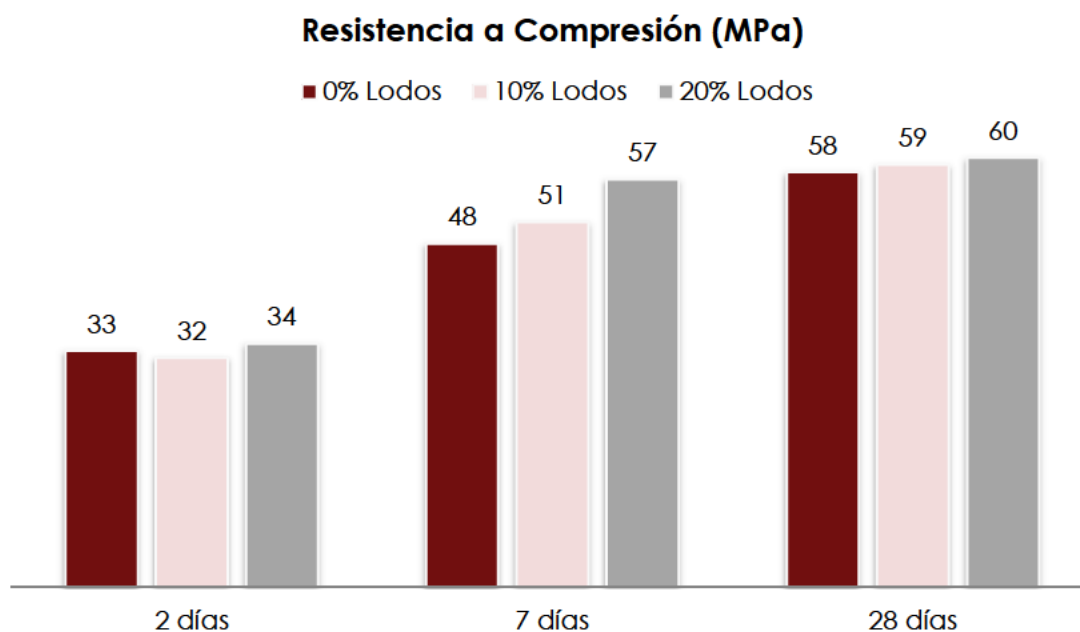


Figura 6- Resistencia a Compresión de morteros de cemento a 2, 7 y 28 días [114]

**2B1B5** ESCORIA GRANULADA DE ALTOS HORNOS

Son un subproducto no metálico producido en un alto horno cuando el mineral de hierro es reducido a hierro dulce. La escoria líquida es enfriada rápidamente para formar gránulos, que son molidos hasta una finura similar a la del cemento portland.

La RC-16 [103] marca que debe estar constituida al menos en dos tercios de su masa por escoria vítrea y posee propiedades hidráulicas cuando se activa de manera adecuada. Los materiales vítreos serán la suma del óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) y dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). El resto será óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y pequeñas cantidades de otros compuestos. La relación en masa ( $\text{CaO} + \text{MgO}$ ) / ( $\text{SiO}_2$ ) será superior a 1,0.

En la fabricación de cemento, en España, se permite el uso de escorias cumpliendo la norma UNE-EN 197-1. Como adición al hormigón no los contempla la EHE ni la norma europea UNE-EN 206:2008. En EEUU sí se permite de conformidad con la norma ASTM C989. En esta especificación se definen tres grados de escorias: 80, 100 y 120, donde el grado más alto contribuye más a la resistencia potencial. Las escorias molidas de alto horno tienen por sí mismas propiedades cementantes, pero éstas son mejoradas cuando se utilizan con cemento portland. Las escorias se utilizan entre el 20 y el 70% en peso de los materiales cementantes.

**2B1C.** PUZOLANAS

Varios materiales naturales poseen, o pueden ser procesados para poseer propiedades puzolánicas. La RC-16 [103] dice que no endurecen por sí mismas cuando se amasan con agua, pero finamente molidas y en presencia de agua reaccionan, a la temperatura ambiente normal, con el hidróxido de calcio disuelto [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] para formar compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio capaces de desarrollar resistencia. Las puzolanas naturales tienen generalmente un origen volcánico y estos materiales silíceos tienden a ser reactivos si son enfriados rápidamente. Normalmente están disponibles en el mercado las que incluyen metacaolín, arcillas, esquistos calcinados o pumita finamente molida. Estos materiales son producidos mediante la calcinación controlada de minerales de origen natural. El metacaolín es producto a partir de arcillas caoliníticas relativamente puras y se emplean entre el 5 y el 15 % en peso de los materiales cementantes. Las arcillas o esquistos calcinados son utilizados a mayores porcentajes en peso. Otras puzolanas naturales son los cristales volcánicos, zeolíticos, ceniza de cáscara de arroz y tierra de diatomeas.

La RC-16 [103] puntualiza que deben prepararse correctamente, es decir, deben ser seleccionadas, homogeneizadas, secadas o tratadas térmicamente y pulverizadas, dependiendo de su estado de producción o de suministro. También hace una distinción entre la puzolana natural y la natural calcinada. Las naturales son normalmente materiales de origen volcánico o rocas sedimentarias con composición química y mineralógica adecuadas. Las puzolanas naturales calcinadas son materiales de origen volcánico, arcillas, pizarras o rocas sedimentarias activadas por tratamiento térmico.

La RC-16 [103] considera el esquisto calcinado en un epígrafe independiente del de las puzolanas y comenta que es un compuesto particularmente bituminoso que se produce en un horno especial a temperaturas de aproximadamente 800°C. Debido a la composición del material natural y al proceso de producción, el esquisto calcinado contiene fases de Clinker, principalmente silicato bicálcico y aluminato monocálcico. También contiene proporciones mayores de óxidos puzolánicamente reactivos, especialmente dióxido de silicio, además de pequeñas cantidades de óxido de calcio libre y de sulfato de calcio. En consecuencia, en estado finamente molido, el esquisto calcinado presenta propiedades hidráulicas, como las del cemento Portland, así como propiedades puzolánicas.

## 2B2. ÁRIDOS LIGEROS (LWA)

La mayoría de los LWC utilizan áridos ligeros. Al restar peso al árido se reduce considerablemente el peso del hormigón y dado que los áridos son el material más inerte que interviene en el hormigón, su sustitución será la que menos afecte a sus propiedades.

La principal clasificación que se hace de los LWA es su origen natural o artificial, sin embargo, en este trabajo se propone una clasificación secundaria que se pasa a describir.

- Áridos naturales
  - Áridos naturales añadidos al hormigón sin recibir tratamiento (pumita) y
  - Áridos naturales modificados, que sufren una transformación antes de convertirse en áridos (perlita o esquistos expandidos)
- Áridos artificiales
  - Creados para su función como LWA (arcilla expandida) y
  - Provenientes del reciclaje. La inquietud por reducir el efecto invernadero de los últimos años lleva a los investigadores a focalizar los estudios en buscar productos que hagan reducir contaminantes, esto se consigue al aprovechar lo que serían materiales desecho para producir áridos, principalmente los áridos provenientes del reciclaje son de origen industrial o de origen vegetal. Entre los primeros se encuentran los ladrillos triturados, las cenizas, neumáticos triturados o espuma rígida de poliuretano desechada. Entre los provenientes de residuos vegetales están las cáscaras de palma para aceite o residuos del lino, en este punto cabe puntualizar que la norma de obligado cumplimiento en España (EHE-08 [104]) no permite el uso de materiales reciclados como árido en el hormigón salvo como gruesos los provenientes del machaqueo de residuos de hormigón y no podrán exceder el 20% en peso del contenido total de árido grueso.



## 2B2A. ÁRIDOS NATURALES.

**2B2A1** La **pumita o piedra pómez**, es una roca ígnea volcánica vítrea, de tan baja densidad que flota en el agua. Con ella se pueden conseguir valores de alrededor de 20 MPa sustituyendo completamente cualquier otro tipo de árido [9]. Es una roca efusiva joven, de terciaria a reciente, que contiene feldespato potásico, cuarzo y plagioclasa.

**2B2A2** La **escoria volcánica** es una roca volcánica que según lo que se triture puede trabajar como grueso o como fino (**Imagen 3**). Los valores a compresión de sus hormigones son muy bajos (4.5 MPa a compresión) [34] dada su baja resistencia.



**Imagen 3-** Áridos finos (arriba) y gruesos (abajo) de escoria volcánica [34]

## 2B2B. ÁRIDOS NATURALES MODIFICADOS

**2B2B1** La **perlita expandida** es un cristal volcánico silíceo formado por capas alternas de alfa ferrita y cementita, que al aplicarle calor aumenta de tamaño hasta 10 veces, su resistencia a compresión varía de 17.3 MPa en hormigones en los que el 20% del árido es perlita expandida a 1.1 MPa si es el 80% [88].

## 2B2C. ARTIFICIALES CREADOS PARA SU FUNCIÓN DE LWA

Los áridos artificiales son los que mejores prestaciones mecánicas han demostrado (arcilla o pizarra expandidas) suelen necesitar tratamientos de calor sobrepasando los 1000°C por lo que los costes medioambientales y en combustible se disparan, sin embargo, son capaces de conseguir hormigones con densidades inferiores a los 2000 Kg/m<sup>3</sup>, y resistencias a la compresión de entre 35 y 40 MPa.

**2B2C1** La **arcilla expandida** (también llamada **arlita o ripiolita**). Tiene una granulometría de entre 5 y 16 mm y un peso de entre 300 y 500 Kg/m<sup>3</sup>. La arcilla expandida se fabrica a partir de arcilla pura que es desbastada, homogeneizada, secada y triturada hasta conseguir un polvo fino, el polvo se mezcla con aceite formando una pasta que se pasa a cocer. En los hornos giratorios la arcilla se expone a un choque térmico de 1200°C, a esta temperatura la arcilla empieza a fundir al tiempo que la materia orgánica de su interior combustiona, los gases de esta combustión son los que expanden la arcilla hasta 5 veces su tamaño original.

## 2B2D. LWA PROVENIENTES DEL RECICLADO

**2B2D1** **Áridos artificiales de cenizas volantes (AACV)**, son seguramente los áridos que más estudios provocan básicamente por dos razones: porque por sus propiedades puzolánicas reaccionan muy bien con el hormigón dando excelentes resultados; y porque medioambientalmente son muy convenientes ya que las CV son un desecho de las centrales eléctricas. Se lleva fabricando desde los primeros sesenta en Europa y Estados Unidos. Hay 4 procesos básicos para producirlo: peletizado, sintetizado, hidrotérmico y adherido en frío:

- El peletizado trata de que o por agitación o por extrusión se formen pequeñas bolas desde los pequeños granos con la ayuda de un aglomerante.
- El sintetizado es mediante la aplicación de calor en hornos de rotación.
- El hidrotérmico es añadiendo a las cenizas cal o cemento para producir la reacción térmica que hará que se adhieran las partículas.
- En el adherido en frío además de cal o cemento se le añaden otros productos como arcilla, caliza o pizarra para provocar la unión en bolitas.

### 2B2D2 Árido de plástico reciclado

El plástico se ha convertido en un material indispensable en nuestra vida debido a sus innumerables usos y posibilidades. Los principales factores que llevan a este éxito son la baja densidad, resistencia, adaptable a cualquier diseño, capacidad de fabricación, larga vida, bajo peso y bajo coste [40]. La parte negativa de esta realidad es la cantidad de desechos que se producen y de ahí la necesidad de darle uso al material reciclado. (ver **Tabla 3** y **Tabla 4**)

**Tabla 3** - Toneladas de plástico consumidas anualmente

Consumo de plástico en:	Cantidad (millones de toneladas)	Referencia
Reino Unido	4.7	[115]
Europa occidental	43.5	[116]
EEUU	26.7	[117]
España	3.5	[118]

Tabla 4 - Tipos de plásticos y usos [119]

Nombre del plástico	Descripción	Usos del plástico virgen
tereftalato de polietileno (PET)	Plástico claro resistente, puede ser utilizado como una fibra	Botellas de refrescos y agua mineral, relleno de sacos de dormir y almohadas, fibras textiles
polietileno de alta densidad (DPE)	Plástico muy común, generalmente de color blanco o de color	Bolsas de la compra arrugadizas, bolsas de congelación, botellas de leche y nata, botellas de champú y productos de limpieza, cajas de leche
poli cloruro de vinilo sin plastificar (UPVC)	Plástico rígido duro, puede ser claro	botellas de zumo y néctares, blisters, tuberías de fontanería y conexiones
poli cloruro de vinilo plastificado (PPVC)	Flexible, claro, elástico plástico	Manguera de jardín, suelas de zapatos, bolsas de sangre y tuberías
Polietileno de baja densidad (LDPE)	Suave, flexible	Tapas de los envases de helados, bolsas de basura, cubos de basura, hojas de plástico negro
Polipropileno (PP)	Plástico duro, pero flexible - muchos usos	Envases de helados, bolsas de patatas crujientes, pajitas, cajas de almuerzo
Poliestireno (PS)	Plástico quebradizo rígido. Puede ser claro y vítreo	Envases de yogur, cubiertos de plástico, cristal de imitación
Poliestireno expandido (EPS)	Espumado, ligero, absorbe la energía, aislamiento térmico.	Tazas de bebidas calientes, envases de alimentos para llevar, bandejas de carne, envases

En España, el uso de plásticos por tipos se detalla en la Figura 7.

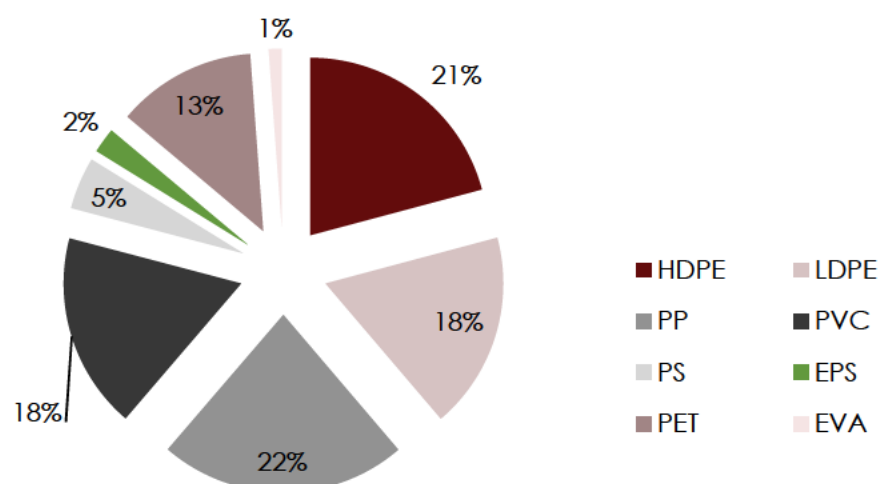


Figura 7- Consumo de plásticos en España por tipos Centro Español de Plásticos [54]

En la literatura científica, como se observa en la Tabla 5 varios estudios analizan la viabilidad del plástico reciclado como árido con distintas conclusiones. Si bien siempre resulta un árido válido, no siempre lo es para hormigón estructural.

El plástico más utilizado es el PET proveniente de las botellas de agua, dándole uso como árido fino para la elaboración de LWC estructural

Tabla 5 - Propiedades de distintas pastas con plástico en la literatura

Referencia	Tipo de pasta	Tipo de árido	Origen del desecho plástico	Tamaño y forma del árido	Densid. (kg/m <sup>3</sup> )	% sustit.	Resist. compr. (MPa)	Susti. en :
Albano, et al. [60]	Hormigón	Árido fino	Botellas PET	0,26 y 1,14 cm (tamaño medio de las dos fracciones)		10,00%	22,5	Volumen
			Botellas PET	0,26 y 1,14 cm (tamaño medio de las dos fracciones)		20,00%	18,5	Volumen
Batayneh, Marie y Asi [120]	Hormigón	Árido fino	-	0,15 - 4,75mm	2307	5,00%	26	Volumen
			-		28,56	10,00%	21,5	Volumen
			-		2693	15,00%	17	Volumen
			-		2495	20,00%	9,8	Volumen
Kou, et al. [55]	Hormigón con LWA	Árido fino	Tuberías de PVC	≤5 mm granular	1730	5,00%	37,1	Volumen
					1620	15,00%	33,2	Volumen
					1600	30,00%	31,9	Volumen
					1540	45,00%	21,5	Volumen
Marzouk, Dheilly y Queneudec [44]	Mortero	Árido fino	Botellas PET	Ancho: 0,15 - 4mm (copos) Tipo A: ≤0,5 cm	2050	2,00%	62	Volumen
					2000	5,00%	58,5	Volumen
					2040	10,00%	57	Volumen
					1990	15,00%	54	Volumen
					1975	20,00%	56	Volumen
					1955	30,00%	53,5	Volumen
					1890	50,00%	50	Volumen
					1885	70,00%	50,5	Volumen
					1330	100,00%	17	Volumen
Ben Fraj, Kismi y Mounanga [61]	Hormigón	Árido grueso	Espuma de poliuretano de residuos de paneles de aislamiento de la construcción	8 - 20 mm	1700	34,00%	16,6	Volumen
					1687	34,00%	9,8	Volumen
					1685	35,00%	12,2	Volumen
					1530	45,00%	8,1	Volumen
Remadnia, et al. [121]	Mortero	Árido fino	Botellas PET	≤ 4mm de espesor		35,00%	46	Volumen
Hannawi, Kamali-Bernard y Prince [45]	Mortero	Árido fino	Una mezcla de PET y desechos de la industria de policarbonato	1,6 - 10mm (PC)	2138	3,00%	50	Volumen
					2059	10,00%	38	Volumen
					1953	20,00%	28	Volumen
					1643	50,00%	19	Volumen
Kan y Demirboga [56]	Hormigón	Árido fino y grueso	Compuesto de desecho de materiales de envases espuma de poliestireno expandido		2025	25,00%	23,34	Volumen
					1741	50,00%	17,85	Volumen
					1734	50,00%	1,65	Volumen
					1692	50,00%	13,93	Volumen
					1377	75,00%	13,08	Volumen
Mounanga, et al. [33]	Mortero	Con árido fino	Desecho de espuma de poliuretano de paneles de aislamiento de la construcción	< 10 mm	980	100,00%	12,58	Volumen
					1583	17,30%	10,4	Volumen
					1655	17,00%	9,3	Volumen
					1349	21,80%	6,5	Volumen
					1261	28,20%	3,2	Volumen
Choi, et al. [62]	Mortero y hormigón	Con árido fino	Botellas PET	0,15 - 4,75 mm redondeado y suave	2260	25,00%	33	Volumen
					2170	50,00%	31	Volumen
					1940	75,00%	28	Volumen



Referencia	Tipo de pasta	Tipo de árido	Origen del desecho plástico	Tamaño y forma del árido	Densid. (kg/m <sup>3</sup> )	% sustit.	Resist. compr. (MPa)	Susti. en :
Choi, et al. [63]	Mortero y hormigón	Con árido fino	Botellas PET	Redondeado y suave	2260	25,00%	33,8	Volumen
					2160	50,00%	31,8	Volumen
					1940	75,00%	24,9	Volumen
Malloy, et al. [57]			HDPD		1792	100,00%	20	Volumen
			Mezcla de plásticos		1969	20,00%	22	Peso
Akçaözoğlu, Atiş y Akçaözoğlu [122]	Mortero	Con árido fino	Botellas PET	0,25-4mm	1561	100,00%	22,4	Peso
					1552	100,00%	26,5	Peso
					1840	50,00%	27	Peso
					1789	50,00%	28,3	Peso
Panyakapo y Panyakapo [58]	LWC no estructural	Con parte de arena y hormigón aireante	Restos de melamina	<10mm	1147	50,00%	1,13	Peso
					1106	33,00%	1,07	Peso
					1045	20,00%	0,92	Peso
					990	16,60%	0,61	Peso
Frigione [123]	Hormigón	Árido fino	Botellas PET	Espesor: 1-1,5mm Tamaño: 0,1 - 5mm		5,00%	68	Peso
Ismail y Al-Hashmi [59]	Hormigón	Árido fino	Envases 80% polietileno y 20% poliestireno	Longitud: 0,15- 12mm	2310	10,00%	33	Peso
					2245	15,00%	30	Peso
					2230	20,00%	30	Peso

En la **Figura 8** se analiza la resistencia a compresión en función de su densidad y se observa como efectivamente, y tal y como ocurre con el resto de hormigones, hay una relación que se describe en la **Figura 9**. Los datos se agrupan en torno a dos curvas con una línea de tendencia clara en donde los incrementos en la resistencia a compresión van aparejados a incrementos en la densidad.

En la **Figura 10** se comparan la relación resistencia a compresión - densidad, en el caso de LWC con áridos plásticos y LWC tradicionales.

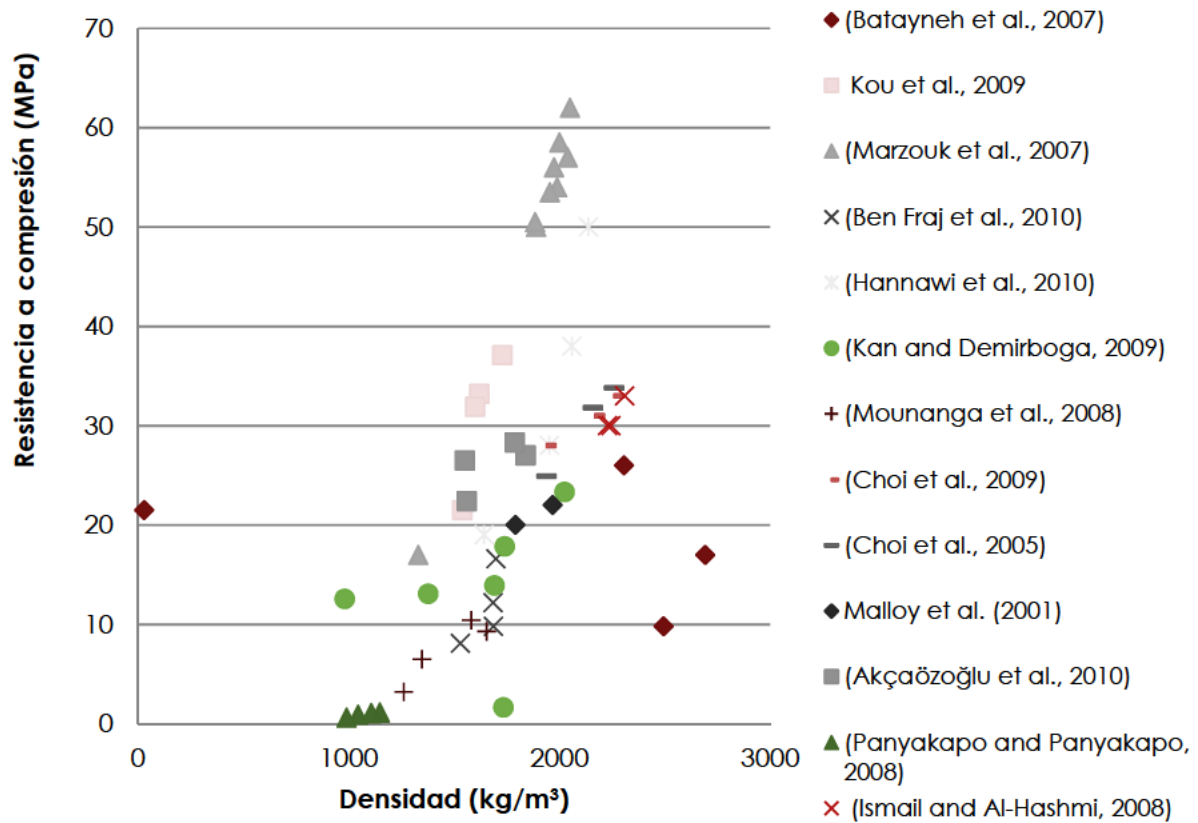


Figura 8 - Resistencia a compresión en función de la densidad

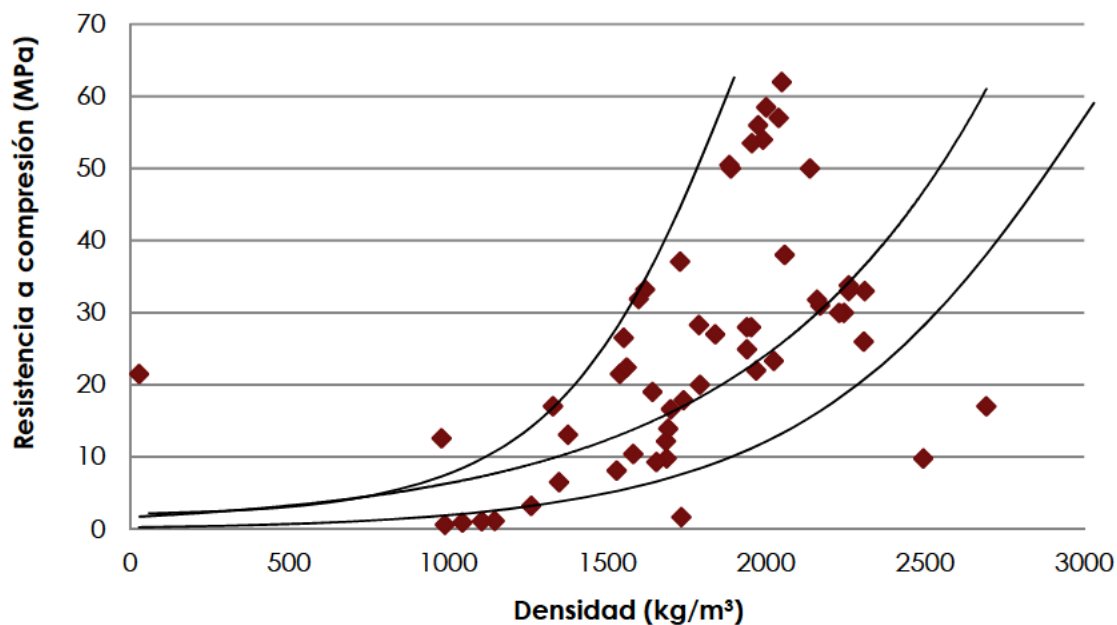


Figura 9- Resistencia a compresión en función de la densidad con línea de tendencia

Otro dato que suelen contener todos los estudios es el porcentaje de sustitución del árido tradicional por el LWA, esto es porque habitualmente se complementan ambos tipos de áridos siendo el plástico parte de LWA normalmente. En la Figura 11 se observa cómo no parece existir una relación clara entre este porcentaje y la resistencia de la pasta.

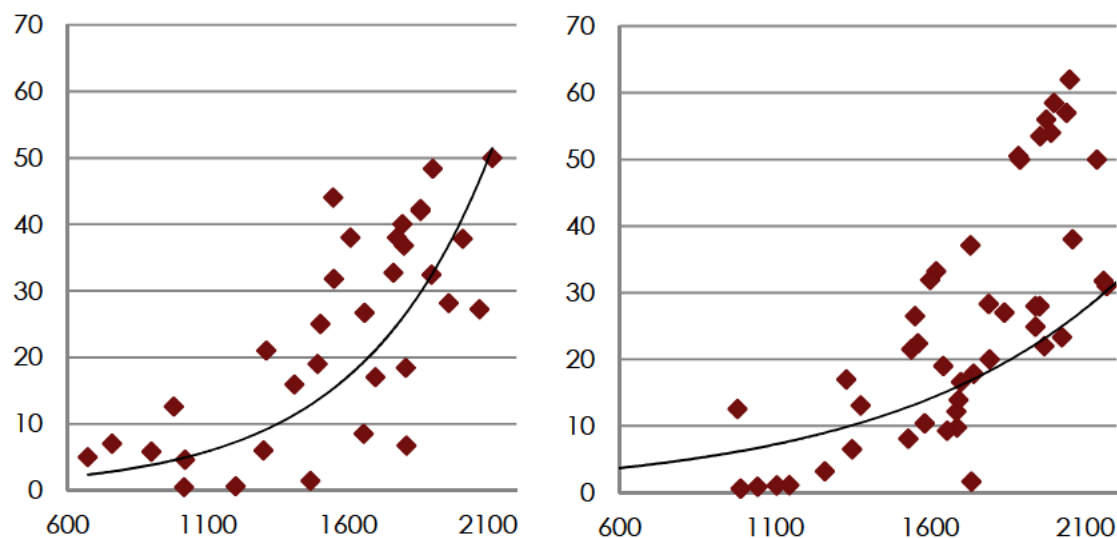


Figura 10- Comparativa resistencia-densidad, LWC (Izda.) - árido plástico (Dcha.)

Dentro de la familia de los plásticos se encuentra la espuma rígida de poliuretano que es un polímero muy consumido por la construcción, los restos de paneles durante las obras son un residuo común y una vez triturado puede ser un árido válido para los LWC. Si bien la resistencia obtenida en estudios como el de Mounanga et al [33] no consigue valores muy altos, alrededor de 3.4 MPa a compresión cuando actúa sólo como finos o 17 MPa cuando actúa como grueso [61] , sí que sus niveles como aislamiento térmico lo hacen interesante. Este tipo de árido puede sustituir por granulometría a los finos o a los gruesos según el nivel de triturado. Las investigaciones en este material siguen por el camino de conseguir mejores resultados en sus propiedades mecánicas.

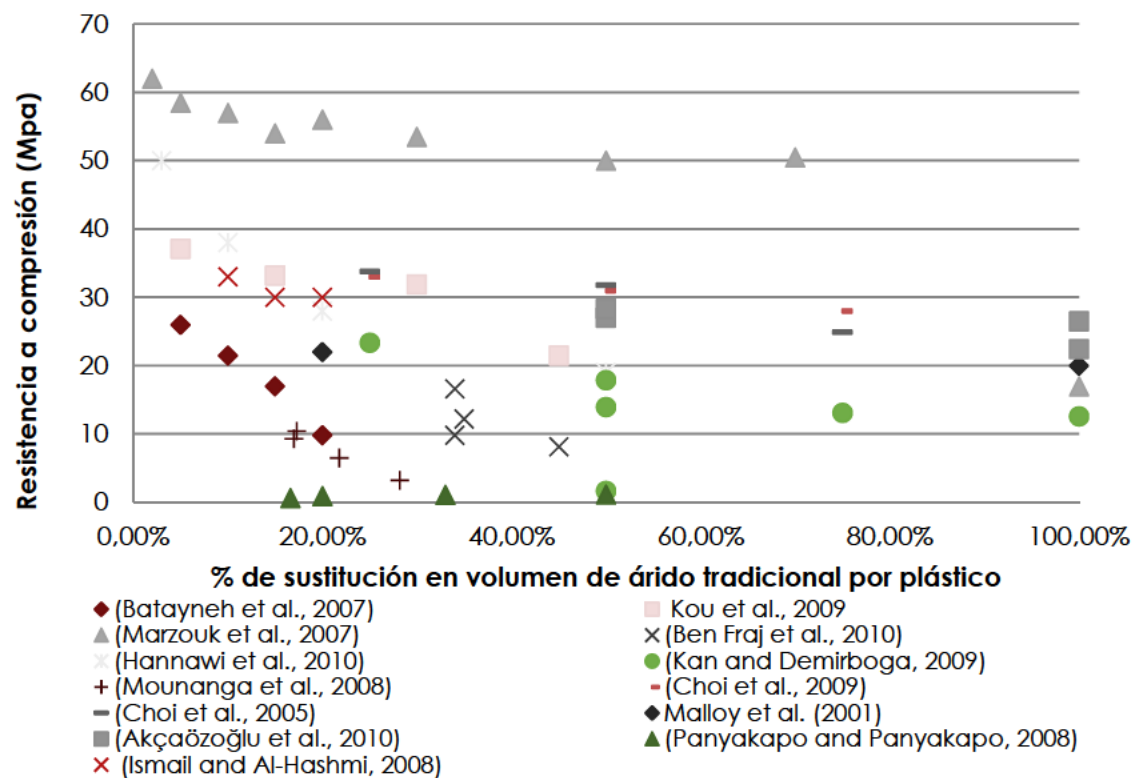
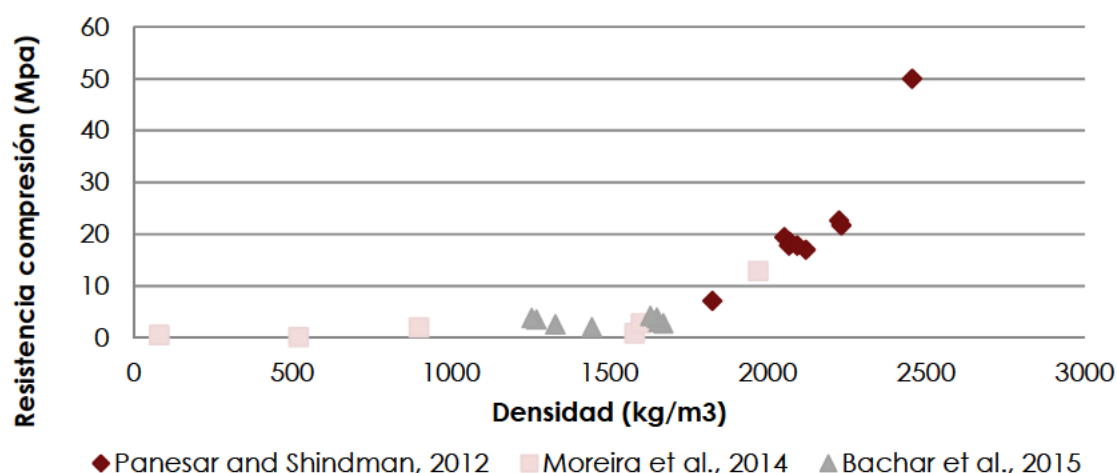


Figura 11- Resistencia a compresión en función del % de sustitución

Otro plástico que merece mención en este epígrafe es el proveniente de los neumáticos desechados. El vertido de neumáticos es causa de importantes daños ecológicos, porque contienen componentes tóxicos y solubles y porque, aunque sean difíciles de empezar a arder, una vez que empieza expulsa humo tóxico, además, si debido a altas temperaturas se funde, produce un aceite que contamina suelo y acuíferos.

Para obtener árido para el hormigón de neumáticos desechados hay dos métodos: el triturado mecánico a temperatura ambiente y el triturado criogénico a temperatura inferior de la transición vítrea [52]. El uso de neumáticos desechados en el hormigón reduce su resistencia a compresión y tracción [53, 124-127] Pero sí se recomienda su uso en zonas de alto riesgo sísmico por su elevada capacidad de absorción de energía y resistencia al impacto [126, 128] y el uso de CV minimiza la reducción en la resistencia [53]

**2B2D3** Los **gránulos de los desechos de corcho** tienen un comportamiento similar al de los neumáticos, los estudios realizados concluyen todos que si bien la resistencia de hormigón y morteros se reduce con su uso pero la capacidad de absorción de energía y resistencia al impacto, además de reducir considerablemente su densidad, y de ahí que sea un interesante componente del hormigón en zonas de riesgo sísmico [47-49, 129, 130]. En la **Figura 12** se muestran la relación compresión densidad de algunos hormigones con gránulos de corcho.



**Figura 12-** Relación resistencia a compresión - densidad

**2B2D4** Las **cenoesferas (microesferas cerámicas)** son un residuo de la combustión del carbón y centrales térmicas, son unas esferas ligeras, inertes y huecas con aire o gas inerte en su interior. Con porcentajes de entre el 20 y el 25% de cenoesferas se han conseguido hormigones con densidades entre 2003 y 1810 Kg/m³ y resistencias a la compresión de 9.3 a 6.7 MPa [87]. Al tener una granulometría tan constante se debe combinar con otros áridos, en estos estudios se han utilizado tanto con arena como con grava tradicional lo que explica que no se consiga bajar demasiado la densidad de la mezcla. (**Imagen 4**).



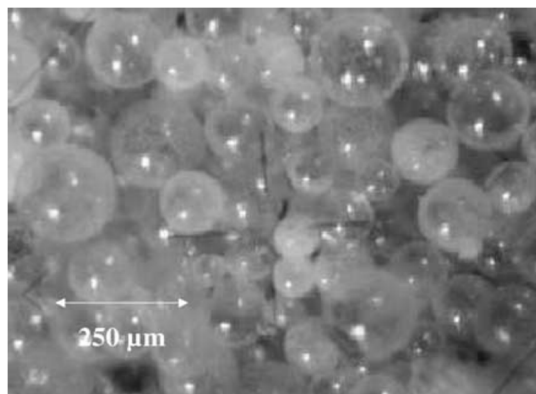


Imagen 4- Micrografía de luz mostrando cenoeferas puras (750×)[87]

**2B2D5** La **cáscara de palma para aceite (OPS)** es un subproducto de la industria del aceite de palma que abunda en zonas tropicales y que se ha demostrado válido como árido de LWC. El estudio de Shafigh, Jumaat y Mahmud [51] ha demostrado que se pueden conseguir valores en hormigones de 28 días, de entre 43 y 48MPa a la compresión y densidades de entre 1870 y 1990 Kg/m<sup>3</sup>. Este árido se utiliza como sustitutivo de los gruesos, pero para los finos necesita de otro material que generalmente es arena común. En este tipo de áridos poco manipulados el problema es que se hace necesario un control en la selección de especímenes ya que las diferencias entre una cáscara almacenada desde hace una semana y otra de tres es sustancial, también el origen de la palma puede suponer deferencias notables, sin embargo, el alto volumen de la producción de este tipo de aceites hace recomendable su uso en las zonas en las que se produce.

En la **Imagen 5** se presenta una imagen con este tipo de árido en su estado más fresco, a la derecha, con fibras y muestras almacenadas durante más semanas en la parte izquierda de la fotografía.

**2B2D6** El **sedimento desechado de las depuradoras**, aunque los estudios lo validan para uso de hormigón no estructural y hace necesarios distintos estudios para los residuos de cada planta e incluso así hay que tener en cuenta la heterogeneidad del material. Para conseguir este tipo de árido se mezcla arcilla con los sedimentos y se reproduce el procedimiento de fabricación de las arcillas expandidas.

**2B2D7** Los **sedimentos de embalses de agua** también han sido estudiados para este uso aplicándoles el mismo tratamiento que a los anteriores [131]. Con estos áridos se pueden conseguir hormigones de densidad alrededor de los 1500 Kg/m<sup>3</sup> y resistencias a la compresión entre 20 y 35 MPa.

**2B2D8** También el **sedimento derivado del pulido de la porcelana y alfarería** en general puede ser utilizado como árido válido tras mezclarlo con árido de rocas ricas en zeolita.



Imagen 5 - Áridos gruesos de OPS con y sin fibra [51]

## 2B2E. SUSTITUTIVOS DE ÁRIDO

El **Aquagel** (LWC basado en **almidón**) no es estrictamente hablando un árido sino un producto que sustituye al árido en el hormigón. Proviene del almidón del trigo y maíz y es un gel semirrígido que se presenta en forma de bolitas, trozos angulosos o pequeños cilindros con el que se puede producir hormigón realmente ligero, ( $< 1300 \text{ Kg/m}^3$ ) pero con una resistencia mecánica muy baja que lo hace viable para su uso en cerramientos (tiene alta capacidad como aislamiento térmico) pero no tanto en hormigones estructurales (Glenn et al, 2004). (Imagen 6).

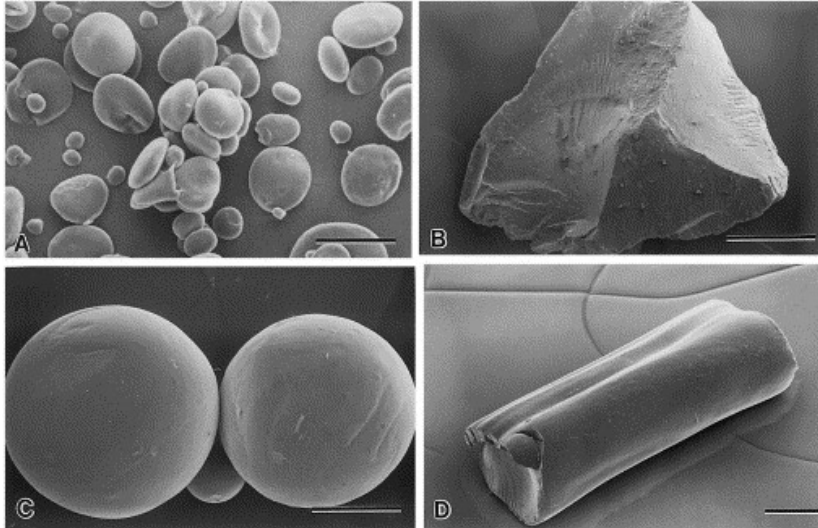
Y siguiendo en la línea del hormigón con aquagel, que no tiene árido propiamente dicho, mención expresa merece el **hormigón celular**, en el que no hay ningún tipo de árido ni producto que lo sustituya.

## 2B2F. CONCLUSIÓN

Tras este repaso a algunos de los áridos que son objeto de estudios los últimos años, es fácil comprobar que el catálogo es enorme, sin embargo, de todos éstos, sólo tres son objeto de más de la mitad de los estudios publicados y cada uno pertenece a un gran grupo de los expuestos, son la pumita, como principal exponente de los áridos naturales, la arcilla expandida como árido artificial y los AACV como árido del reciclado industrial. De estos tres tipos de áridos sólo la pumita se suele usar como fino y grueso, la arcilla expandida y los AACV se suelen combinar con un fino actuando solo como gruesos y los finos suelen ser arenas.

### 2B3. ADITIVOS

Los aditivos son aquellos productos que introducidos en el hormigón permiten modificar sus propiedades en una forma susceptible de ser prevista y controlada.



**Imagen 6-** Micrografías de gránulos de almidón de trigo (A), partículas angulares (B), cuentas esféricas (C), y cilindros extruidos (D). [86]

El uso de aditivos para la elaboración de LWC va enfocado principalmente a dos usos; Uno es la reducción del uso de cemento con otros materiales con las que se consigan características similares con otros materiales medioambientalmente más saludables. Otro uso de los aditivos es la mejora de las características del hormigón como incrementar resistencia, fluidificar, etc.

El tipo más utilizado en este tipo de hormigones es el SP, esto es debido a que, dado que los LWA suelen ser más porosos y necesitan más agua de lo habitual, y el aumento del agua reduce la resistencia del hormigón, el uso de SP permite menor cantidad de agua para una trabajabilidad suficiente. (Ver **Figura 13** y **Figura 14**)

El otro tipo más utilizado son los agentes inclusores de aire, dado que su uso es, junto con la utilización de LWA, la otra manera de conseguir que el hormigón reduzca su peso. El uso del resto de aditivos es menos común en la producción de LWC.

La EHE-08 [104], española fija que su proporción no puede ser superior al 5% del peso del cemento y contempla 5 tipos: Reductores de agua / Plastificantes, Reductores de agua de alta actividad / SP, Modificadores del fraguado / Aceleradores, retardadores, Inclusores de aire y Multifuncionales.

A continuación, se pasará a describir las principales características de los tipos de aditivos más comunes.

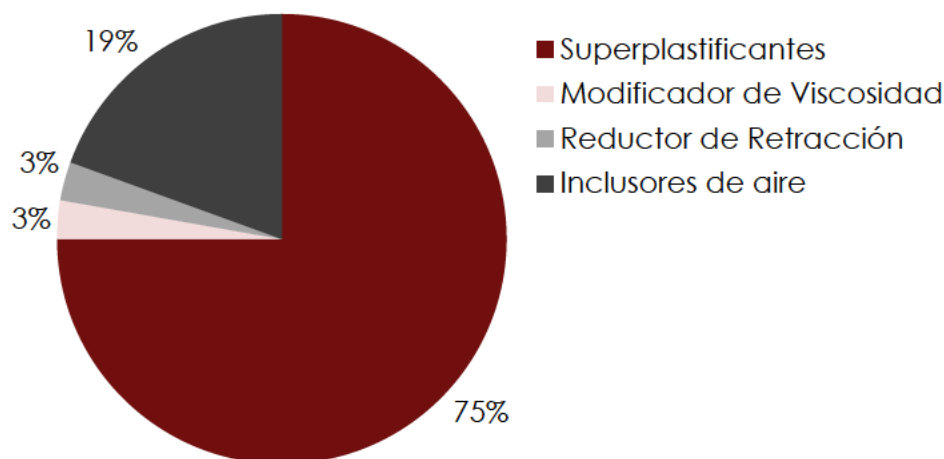


Figura 13- Familias de aditivos utilizados en los artículos seleccionados

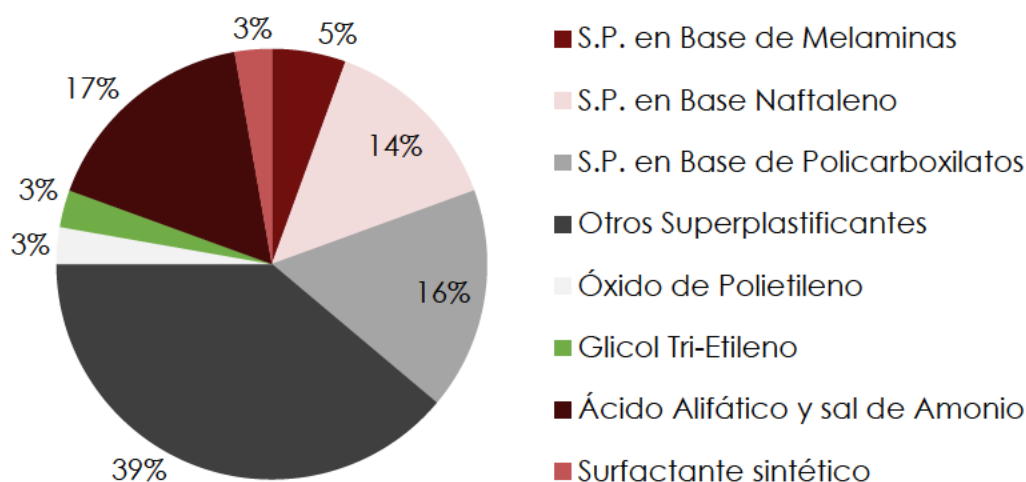


Figura 14- Aditivos utilizados en los artículos seleccionados

### 2B3A. SUPERPLASTIFICANTE (SP)

Dada la naturaleza de la mayoría de los LWA normalmente se hace necesario el uso de SP. Son aditivos que, sin modificar la consistencia, reduce el contenido de agua (lo que aumenta la resistencia y durabilidad) o, con el mismo contenido del agua, mejora la trabajabilidad. Dentro de este tipo de aditivos se encuentran los siguientes tipos:

- Lignosulfonatos; Se extraen del proceso de producción de la celulosa.
- Naftalen sulfonatos y melamina sulfonatos; del proceso de refinado del carbón.
- Policarboxilatos; La última generación, químicamente se basan en copolímeros de ácido acrílico y ésteres de estos ácidos.

Los efectos principales que se derivan de la incorporación de algún componente tensoactivo son por una parte la ionización de los filamentos del aditivo que produce la separación de los granos de cemento entre sí, conduciendo a una

efectiva desfloculización, y, por otra parte, las moléculas de aditivo son absorbidas y se orientan en la superficie de los granos de cemento en un espesor de varias moléculas, de lo que resulta una lubricación de las partículas.

Para entender mejor el funcionamiento de estos aditivos se hace preciso comentar el comportamiento agua-cemento en el proceso de mezclado y fraguado del hormigón. Como es sabido, primero se forma la pasta aglutinante producto de la lubricación de las partículas de cemento y de árido tras la adsorción del agua, y luego esta pasta se vuelve cementante producto de la reacción química que se lleva a cabo entre ambas al iniciarse el fraguado.

En la primera de estas etapas es cuando se produce la mezcla de los componentes y las primeras reacciones electroquímicas entre agua y cemento, apareciendo las características del hormigón fresco como trabajabilidad, docilidad, consistencia, etc.

Estas características están gobernadas principalmente por las reacciones electroquímicas producidas entre las moléculas de agua y los granos de cemento, los que poseen un gran número de iones en disolución en su superficie. Estos iones tienden a formar, debido a una afinidad electrostática, flóculos o capas de solvatación al entrar en contacto con el agua durante la operación de amasado. Dichos flóculos ejercen dos efectos nocivos en la masa de hormigón.

- Impiden la dispersión uniforme de las partículas de cemento en la masa de hormigón.
- Retienen cierta cantidad de agua en el interior de su masa que incide negativamente en la porosidad final del material por no ser utilizable para lubricar la masa ni para la lubricación de los granos de cemento.

Los efectos nocivos de la floculación pueden ser contrarrestados, al menos en parte, mediante la incorporación a la masa de hormigón de ciertos compuestos químicos tales como policondensados de naftaleno y formaldehído, también llamados SP, reductores de agua de alto rango o superfluidificantes.

Estas adiciones actúan neutralizando las cargas eléctricas que se encuentran sobre la superficie de las partículas de cemento y, por consiguiente, evitando la formación de flóculos. La forma lineal y alargada de estas moléculas orgánicas les permite recubrir por completo la superficie de los granos de cemento incorporándole cargas de signo negativo, provocando una fuerza de repulsión entre las partículas de cemento dificultando el fenómeno de la floculación. (**Figura 15**).

Sin embargo, como consecuencia del efecto envolvente de estas moléculas puede ocurrir que, en altas dosis se produzca un efecto de retardo de la hidratación de los granos.

En el modo de acción de los SP pueden considerarse tres etapas consecutivas:

- Adsorción de los polímeros por parte de las partículas de cemento en la etapa de transición sólido-líquido.



- Carga de la superficie de los granos con fuerzas electrostáticas de repulsión por tener el mismo signo.
- Aparición de tensiones superficiales que aumentan la distancia entre partículas.

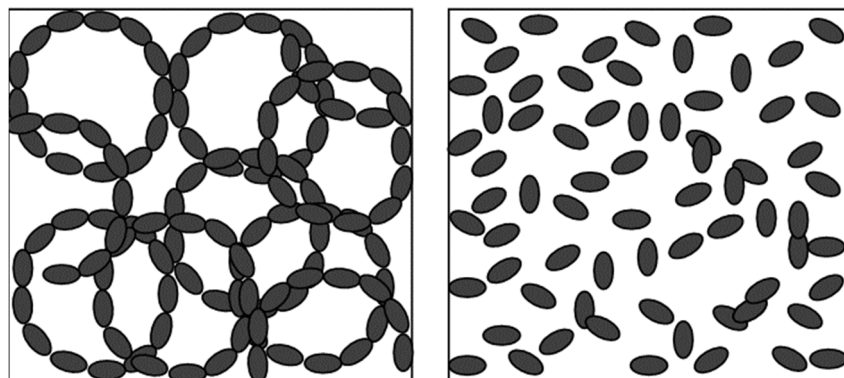


Figura 15- Esquema de partículas floculadas (izda.) y dispersas (drcha).

### 2B3B. INCORPORADORES DE AIRE

En 1932 se observó en los Estados Unidos que algunos tramos de carretera resistían mejor el efecto del hielo que otros. Analizando este hormigón al microscopio, se observó que contenía una gran cantidad de microburbujas de aire, determinándose que había sido confeccionado con cemento procedente de fábricas que usaban en la molienda aditivos a base de aceite vegetal o de jabón.

Esta experiencia hizo resaltar el efecto del aire incorporado sobre la resistencia del hormigón a los procesos de hielo-deshielo, lo que fue confirmado en experiencias posteriores.

El hormigón, además de sus componentes sólidos, contiene un porcentaje de vacíos de formas y dimensiones variadas, provenientes del aire atrapado y de la fracción del agua de amasado que se evapora. En cambio, al utilizar un incorporador de aire se producen microburbujas esféricas cuyos diámetros oscilan entre 25 y 250 $\mu$  con una distancia entre ellos de 100 a 200 $\mu$ .

Para otorgar resistencia a las heladas interesa particularmente que las burbujas sean pequeñas. La pasta de cemento está protegida contra los efectos del hielo-deshielo, si el factor de distancia es menor a 0.20 mm.

#### Mecanismo de acción:

Durante el amasado del hormigón se forman burbujas de aire de diferentes tamaños, debido a los movimientos internos de los materiales del hormigón.

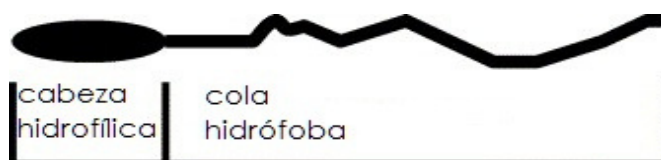
Cuanto más pequeña es la dimensión de las burbujas, mayor es la presión ejercida sobre ellas, por lo que éstas tienden a disolverse en el agua. Por su parte, las burbujas de mayor dimensión, debido a la menor presión que experimentan, tienden a crecer, son más deformables y pueden escapar especialmente durante la compactación del hormigón. Las que no se escapan pueden aumentar de volumen,

alimentadas por las más pequeñas, formando huecos que permanecen indefinidamente en el hormigón.

De lo anterior se deduce que un NC, sin aditivo plastificante, prácticamente no puede contener burbujas inferiores a 0.1 o 0.2 mm. puesto que éstas se disuelven en el agua. Sin embargo, con aditivo, aun cuando la cantidad de aire sea similar, sus características serán muy distintas desde el punto de vista reológico y de su resistencia al hielo.

Los incorporadores de aire son productos de naturaleza aniónica que, al introducirse en una pasta de cemento, quedan adsorbidos sobre la superficie de las partículas de cemento formando una delgada capa de filamentos de naturaleza hidrófoba, orientados desde la superficie de éstas últimas hacia la fase acuosa entre granos sólidos y con su fase polar adherida a la superficie de los granos de cemento.

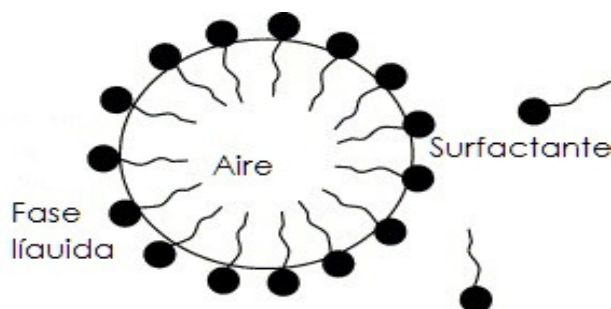
Por otra parte, una pequeña proporción del producto se disuelve en fase líquida y, durante el amasado del hormigón, produce burbujas de aire que quedan distribuidas en dicha fase sin unirse entre sí debido a que en ellas los filamentos se orientan hacia el interior de las burbujas con su fase polar sobre dicha superficie. (**Figura 16, Figura 17 y Figura 18**)



**Figura 16-** Esquema de la naturaleza química básica de los surfactantes. [132]

La cantidad y características del aire incorporado dependen de numerosos factores, entre los cuales pueden dimensionarse:

Tipo y cantidad del aditivo; Intervienen tanto sobre la cantidad como sobre el tamaño, distribución y estabilidad de las burbujas de aire incorporadores.



**Figura 17-** Distribución de las moléculas de surfactante en la interfase agua - aire. [132]

Tipo y dosis de cemento; La cantidad de aire incorporado disminuye cuanto más fino es el cemento y más alta es su dosis en el hormigón.

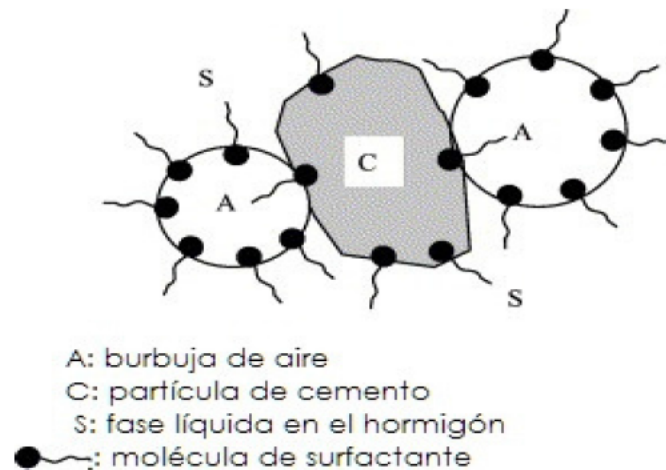


Figura 18- Interacción entre burbujas de aire y partículas de cemento. [132]

Docilidad del hormigón; La cantidad de aire y tamaño de las burbujas de aire incorporado aumentan con la mayor fluidez del hormigón. En relación con este último aspecto, pueden señalarse los siguientes valores (Tabla 6):

Las características del hormigón inciden en la cantidad de aire incorporado. Entre ellas pueden mencionarse:

- Cantidad de cemento en el hormigón.
- Tamaño máximo de los áridos grueso
- Contenido de finos.

Tabla 6 - Relación a/cm y tamaño de las burbujas

RELACION A / CM	TAMAÑO DE LAS BURBUJAS
0.35	10 – 100 $\mu$
0.55	20 – 200 $\mu$
0.75	50 – 500 $\mu$

Cuanto más porcentaje de cemento tenga un hormigón menos burbujas de aire podrá contener ya que los áridos gruesos propician la formación de burbujas y los finos la impiden (entendiendo como cemento unos finos de muy pequeño tamaño).



## 2B4. FIBRAS

La EHE recoge el uso de hormigón con fibras y lo define como: aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa. Su uso se recomienda para:

- mejorar el débil comportamiento que presenta el hormigón en masa a flexotracción ya que se le considera como un hormigón con armadura con menor eficiencia a la tracción.
- Mejora la resistencia al impacto y a la fatiga.
- Se obtiene un mayor control de la fisuración, permitiendo superficies continuas de mayores dimensiones y más duraderas
- Mejor anclaje de las armaduras
- Mejor resistencia al fuego disminuyendo el efecto "spalling"
- Aunque supone una mayor dificultad de confección y puesta en obra.

Las fibras se pueden clasificar como no estructurales, con el fin de controlar la fisuración o mejorar resistencia al fuego; y estructurales, teniendo que incluirse entonces estas en el cálculo.

Las fibras son elementos de corta longitud y pequeña sección, caracterizados dimensionalmente por su longitud ( $l_f$ ), diámetro equivalente ( $d_f$ ) y esbeltez ( $\lambda$ ), y estructuralmente por su resistencia a tracción.

Según su uso y composición pueden presentar formas muy variadas: rectas, onduladas, corrugadas, con extremos conformados, etc.

El efecto de las fibras sobre las propiedades del hormigón es mayor cuando aumenta la esbeltez (relación largo/ancho) de las mismas y su dosificación, pero empeora la trabajabilidad y aumenta el riesgo de formación de erizos. Para evitar este efecto, es muy recomendable incorporar las fibras junto con los áridos en planta, preferentemente con el árido grueso al inicio del amasado.

La EHE-08 también establece como especificaciones para hormigones estructurales que el tamaño mínimo de la fibra sea 2 veces el tamaño máximo del árido.

Según su naturaleza las fibras pueden ser de inorgánicas: acero, poliméricas, de vidrio, etc. o vegetales. Estas últimas no están contempladas en la EHE-08 y serán las que se traten en este trabajo con mayor profundidad.

Las fibras vegetales están compuestas de celulosa, con cantidades variables de lignina, hemicelulosas y otros componentes minoritarios como agua, proteínas, péptidos y otros compuestos inorgánicos [133]. Las fibras vegetales se clasifican según su procedencia de la zona del vegetal [133]:

- Fibras procedentes del fruto de dicotiledóneas: pelos de semillas (algodón), vainas (Kapok), o cáscaras de frutos (coco)
- Fibras del tallo:

- Fibras maderosas: resinosas (gimnospermas: pino) o frondosas (angiospermas: eucalipto).
- Liberianas: arbustos y árboles (morera de papel) y dicotiledóneas herbáceas (lino, cáñamo, yute...)
- Haces vasculares de monocotiledóneas (pajas de cereales, bambú, bagazo, esparto, cañas...)
- Fibras de hojas (sisal, pita, piña...)

Las fibras vegetales aportan las mejoras antes mencionadas, pero tienen el inconveniente de que reducen la durabilidad. El agua intersticial disuelve el hidróxido de calcio para formar una solución taponada de  $\text{pH} > 13$ . Muchos estudios han relacionado la presencia de este hidróxido de calcio con la degradación de las fibras vegetales, y por lo tanto con la pérdida de durabilidad de la fibra de celulosa en compuestos basados en cemento reforzado [134].

Para mitigar esta reacción hay básicamente dos estrategias, una; modificar la composición de la pasta matriz con el objetivo de reducir o eliminar los compuestos alcalinos, la segunda es modificar las fibras, por métodos químicos o físicos, para aumentar la estabilidad de las fibras en la matriz cementicia.

- Modificar la matriz cementicia. Existen a su vez dos tratamientos para reducir o eliminar la cantidad de porlandita de la matriz; añadiendo compuestos puzolánicos y el proceso de carbonatación.
- Modificar las fibras. La otra estrategia para mejorar la durabilidad consiste en la modificación, química o física de las fibras, para optimizar la adhesión fibra-matriz y hacer las fibras menos sensibles a la composición de la matriz y la humedad ambiente. [135]

Dentro de las llamadas modificaciones químicas de las fibras, están los tratamientos previos de las fibras con agentes químicos (bencina blanca, hidróxido de sodio o cualquier jabón o producto de limpieza ordinario), impregnación de las fibras con agentes bloqueadores (Silicato de Sodio, sulfito de sodio o sulfato de magnesio) o repelentes al agua (resinas epóxicas y de poliésteres, productos bituminosos, barnices, PVA, asfaltos y otros) y la hornificación o cornificación de las fibras que consiste en evitar que la fibra absorba el Hidróxido de Calcio, de una manera económica y amigable ambientalmente. Se realizan ciclos de lavado y secado de las fibras [136, 137].

La fibra originalmente posee una resina propia del material, que impide la absorción de líquidos, evitando una buena adherencia fibra-matriz. Para solventarlo, se realiza un proceso similar al visto anteriormente, en el cual se somete a los NW a un tratamiento de "lavado y secado". Con ello se pretende mejorar la adherencia fibra-matriz, limpiar la fibra de impurezas, ganar estabilidad dimensional del NW y reducir el valor de retención de agua de la fibra; sin modificar la resistencia mecánica de la materia prima. [138]

#### Tratamiento de la Fibra: Lavado y Secado

1. Cortar la fibra en cuadrados de 32 x 32 cm. (no se puede cortar con la medida exacta final, debido a que después del lavado la fibra sufre modificaciones en su formato y dimensión).
2. Se sumerge uno por uno los NW en un recipiente plano con agua a temperatura ambiente, hasta llegar a un total de 10 láminas.
3. Se presiona las fibras manualmente y se cambia el agua hasta obtener un color cristalino.
4. Se elimina el agua y se presiona manualmente los NW para eliminar el exceso.
5. Se coloca una lámina de papel secante 37 por debajo y encima de los NW.
6. Finalmente se introduce las fibras (en un recipiente adecuado) a la estufa ventilada, a 60°C durante 24 horas aproximadamente (tiempo en que tarda en secar la fibra).

#### 2B5. AGUA

Elemento clave para la producción de hormigón y para su fraguado, tiene que cumplir unos requisitos mínimos de calidad como limitación de pH (entre 6 y 8), bajo contenido en sulfatos, cloruros, sales solubles o en suspensión y materia orgánica. De no hacerlo puede afectar negativamente a las reacciones químicas durante el fraguado.

Respecto a la dosificación no hay una exacta ya que depende del uso que vaya a tener el hormigón, cuanto menos tenga el hormigón resistirá más y será más durable, pero será menos manejable a la hora del mezclado y puesta en obra.

Los LWC suelen necesitar más agua que los de peso normal ya que los áridos suelen tener mucha más absorción de agua, de hecho, se suele recomendar el humedecido previo de los áridos, por razón el agua previa tendrá que ser tenida en cuenta para el cálculo de la relación a/cm. Para esta relación el agua total será la suma del agua de los áridos más el agua añadida a la mezcla.

La EHE-08 [104], permite el uso de cualquier agua, para amasado o curado, que no contenga ningún ingrediente perjudicial en cantidad suficiente para afectar a las propiedades del hormigón o sus armaduras. Permite el agua salada para hormigones en masa, pero nunca para armado o pretensado, comenta que habrá que tener en cuenta el contenido en finos en aguas recicladas procedentes del lavado de cubas en la propia central de hormigonado.

## 2C. DOSIFICACIONES

Sobre la dosificación se debe comentar que no podrán ser utilizados métodos que dosifiquen el árido en peso, sino que deberá ser en volumen, de no ser así, al ser más ligeros, el hormigón contendría una excesiva proporción de áridos. La mayoría de los LWA son porosos y absorben más agua que los tradicionales, se deberá realizar un prehumedecido para que toda el agua de la mezcla se use en la hidratación del cemento, la cantidad de agua del humedecido previo se debe contemplar en el cómputo de la dosificación. [104].

Cuando no se utilicen adiciones, como las CV o el HS, y se busquen LWC con altas resistencias, se tendrá que usar una alta proporción de cemento, esto puede suponer que el calor de hidratación provoque microgrietas en la estructura del hormigón y se reduzca notablemente su durabilidad. [97]

Unas condiciones de curado propicias, añadiendo temperatura por encima de los 23°C y humedad superior al 50%, permitirán mejorar la durabilidad y alcanzar resistencias superiores. [21]

Habrá que seleccionar concienzudamente las características del hormigón buscado, con base en estas se tomará un método de dosificación que permitirá tener la mezcla correcta con las propiedades buscadas.

Todas las características son importantes para diseñar una correcta dosificación, las principales serán: las propiedades de trabajabilidad, mecánicas, durabilidad, uniformidad e incluso la economía. De estas, generalmente las de resistencia y durabilidad serán las más importantes y, con base en ellas, el primer paso suele ser la relación agua / cemento.

En este capítulo se tratará de explicar la importancia de la selección de la mezcla, la variedad de métodos que se pueden elegir, así como una exposición de varias mezclas utilizadas para la redacción de numerosos artículos con las diferentes características que ofrecen.

## 2D. PROPIEDADES.

En este punto se tratarán las características, en estado fresco y endurecido, del LWC. El estado fresco las principales son las propiedades reológicas. Del estado endurecido la resistencia es la más importante.

### 2D1. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

#### 2D1A. CALOR DE HIDRATACIÓN

Las reacciones químicas que se producen al fraguar el hormigón son reacciones exotérmicas, esto en ambientes con bajas temperaturas puede causar efectos positivos, pero en grandes masas de hormigón da lugar a patologías. Los LWC se usan a menudo en grandes cantidades en donde su diferencia de peso los hace imprescindibles, pero en estos casos habrá que tener en cuenta los efectos del calor de hidratación. El 50% de este calor se desprende durante las primeras 24 a 48 horas. En un cemento normal el calor que se produce es del orden de 85 a 100cal/g. Cada

compuesto del cemento interviene en algún grado para esta reacción resumiéndose el grado de participación en la **Tabla 7**.

**Tabla 7** – Principales compuestos del cemento en el calor de hidratación

Propiedad	Participación de cada compuesto			
	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S
Grado de reacción	Rápido	Lento	Medio	Lento
Calor liberado	Grande	Pequeño	Medio	Pequeño

La EHE-08 (2009), recomienda el uso de cementos especiales con menos calor de hidratación (LH) para hormigones de alta resistencia o con un alto contenido en cemento, que se realicen en época calurosa o en grandes masas, así como hidratar más este tipo de hormigones durante las primeras horas de curado. La RC-16 indica que los hormigones fabricados con estos cementos necesitarán una protección adicional contra la carbonatación y desecación durante el curado.

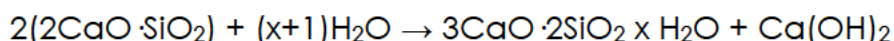
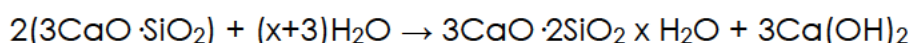
En los hormigones con espumantes el calor puede provocar microgrietas al fraguar.

Usar CV reduce notablemente los picos de temperatura debido a la reducción de la cantidad de cemento, la temperatura puede variar entre 29 y 62°C reemplazando cemento por CV o áridos convencionales por otros ligeros como los que contienen CV. (Jones y McCarthy, 2006)

## 2D1B. CONDICIONES DEL CURADO

El proceso de fraguado es el resultado de reacciones químicas de hidratación entre los componentes del hormigón. El fenómeno físico de endurecimiento no tiene fases definidas. El cemento está en polvo y sus partículas o granos se hidratan progresivamente, inicialmente por contacto del agua con la superficie de los granos, formándose algunos compuestos cristalinos y una gran parte de compuestos microcristalinos asimilables a coloides que forman una película en la superficie del grano. A partir de entonces el endurecimiento continua dominado por estas estructuras coloidales que envuelven los granos del cemento y a través de las cuales progresa la hidratación hasta el núcleo del grano (Soria y Verdu, 1969)

Las dos principales reacciones químicas de hidratación que originan el fraguado son:



En la **Tabla 8** se observa la evolución de un hormigón normal en cifras orientativas.

**Tabla 8**- Evolución de la resistencia a compresión de un hormigón normal [139]

Edad del hormigón en días	3	7	28	90	360
Resistencia a compresión	0,40	0,65	1,00	1,20	1,35



Durante el proceso de fraguado las condiciones en las que se encuentre el hormigón también influirán en su posterior comportamiento. El control de la temperatura y la humedad durante los primeros días permitirá a los hormigones alcanzar resistencias superiores y en esto no hay diferencias entre los LWC y los de peso normal, sin embargo, sí que existen algunos comportamientos durante el curado que influyen (o al menos lo hacen más) en este tipo de hormigones.

Existen varios métodos en la literatura tradicional que son utilizados para favorecer el proceso de fraguado y endurecimiento. Se pueden clasificar como sigue:

- Métodos que suministran humedad adicional a la superficie del hormigón durante el período inicial de endurecimiento. Estos incluyen la inundación o inmersión, el rociado o pulverización y el uso de cubiertas húmedas. Tales métodos proporcionan, por efecto de la evaporación, cierto grado de enfriamiento, que es beneficioso en tiempo caluroso.
- Métodos que impiden las pérdidas de humedad mediante el sellado o impermeabilización de la superficie del hormigón. Esto puede conseguirse empleando papel impermeable, películas plásticas, compuesto de curado y por medio de los moldes y encofrados dejados en su lugar.
- Métodos que aceleran el endurecimiento del hormigón, suministrándole calor y humedad. Esto se lleva usualmente a cabo mediante vapor vivo o resistencias eléctricas.

En la literatura científica consultada el más común es el primer grupo, aportando humedad al hormigón, aunque no siempre se aportan este tipo de datos en los artículos consultados. Dentro del primer grupo, el curado con inmersión también es utilizado con frecuencia (Ver **Tabla 9**) dando en general muy buenos resultados. Por ejemplo, el estudio (Haque y Al-Khaiat, 1999) sobre durabilidad en ambientes cálidos marinos concluye que el que hormigones sumergidos en agua durante los primeros días de fraguado influye más positivamente que en hormigones de peso normal. La comparativa de los resultados de los ensayos se muestran en la **Figura 19**.

**Tabla 9-** Condiciones de curado en los hormigones de los artículos seleccionados

Método de compactación	Condiciones del curado	Nº <sup>a</sup>
Vibrado	Desencofrado tras 1 día y curado a 20 °C y 65% de humedad	[8]
Vibrado	Desencofrado tras 1 día y curado a 20 °C y 65% de humedad	[140]
-	-	[9]
-	-	[141]
-	-	[13]
-	-	[13]
-	Desencofrado tras 1 día y curado a 20 °C y sumergido en tanque de agua	[11]
	Desencofrado tras 1 día y curado a 20 °C y sumergido en tanque de agua	[12]
	Desencofrado tras 1 día y curado a 20 °C y sumergido en tanque de agua	[14]

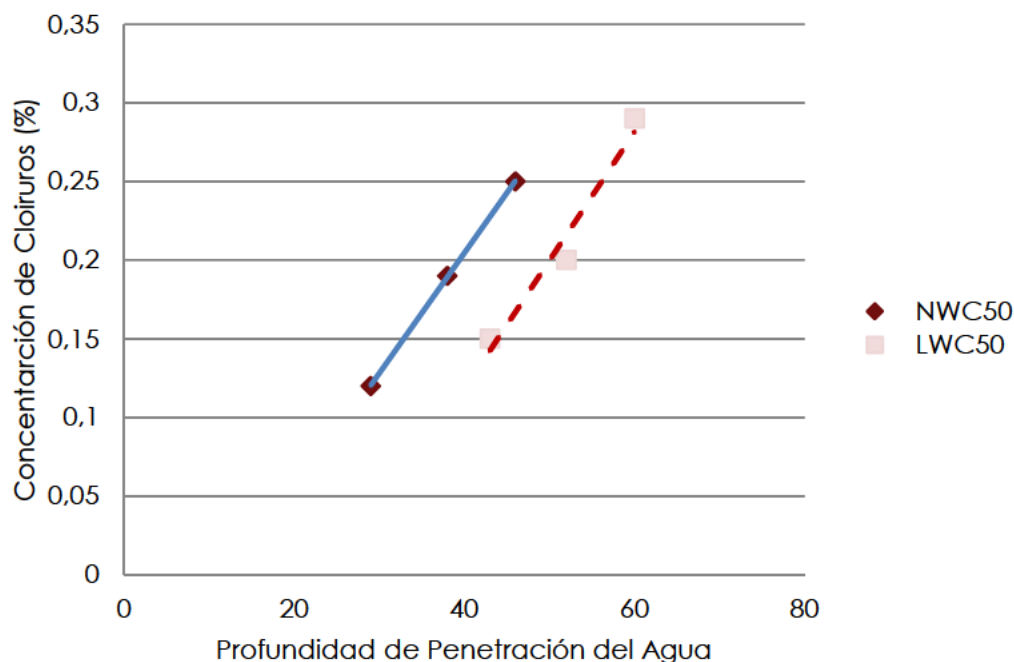
Método de compactación	Condiciones del curado	Nº <sup>a</sup>
	Desencofrado tras 1 día y curado a 27 °C	[21]
-	-	[15]
-	-	[29]
-	Desencofrado tras 1 día y curado a 27 °C	[18]
-	Desencofrado tras 1 día y curado a 27 °C	[18]
-	Primeros 7 días a 29 °C y 100% de humedad, el resto 29 °C y 80%	[1]
-	Primeros 7 días a 29 °C y 100% de humedad, el resto 29 °C y 80%	[1]
Vibrado	Desencofrado tras 1 día y curado a 23 °C y 95% de humedad	[22]
Vibrado	Desencofrado tras 1 día y curado a 23 °C y 95% de humedad	[22]
-	Desencofrado tras 1 día y curado sumergido en tanque de agua	[24]
-	Desencofrado tras 1 día y curado sumergido en tanque de agua	[24]
Vibrado	Desencofrado tras 1 día y curado a 25 °C y 45% de humedad	[16]
	Desencofrado tras 1 día y curado sumergido en tanque de agua	[89]
	Desencofrado tras 1 día y curado a 27 °C y 60% de humedad	[21]
	Desencofrado tras 1 día y curado a 25 °C y 45% de humedad	[91]
	Desencofrado tras 1 día y curado a 25 °C y 50% de humedad	[23]
	Desencofrado tras 1 día y curado a 30 °C y 30% de humedad	[100]
Varilla y vibradora		[26]
	Desencofrado tras 1 día y curado a 21 °C	[27]
	Desencofrado tras 1 día y curado a 22 °C y sumergido en tanque de agua	[28]
	Desencofrado tras 1 día y curado a 23 °C y sumergido en tanque de agua	[93]
	Desencofrado tras 1 día y curado a 23 °C y 45% de humedad	[94]
	Desencofrado tras 1 día y sumergido en tanque de agua	[30]
		[31]
	Desencofrado tras 1 día y curado sumergido en tanque de agua a 25°C	[29]

a: Corresponde con referencia

En los LWC además previo al inicio del curado, los áridos pueden necesitar un tratamiento previo como el humedecido. Dado que los LWA suelen ser más porosos, el humedecerlos previamente hace que toda el agua que se añada durante la mezcla se use para la reacción química del cemento durante el fraguado, pero además supone una "reserva" de agua para un curado más lento (y por lo tanto beneficioso) en el hormigón, esta agua no será inmediatamente absorbida e hidratará la matriz cementosa poco a poco y esto influirá positivamente en el grosor y porosidad de la ITZ como se verá más tarde.

Sobre el tercer método, aportando temperatura y humedad, Lo, et al. [21] aseguran que un fraguado acelerado con altas temperaturas da mejores resultados que el fraguado normal. Comparando LWC con normales con el mismo fraguado los normales son mejores. Con un curado acelerado con calor los ligeros pueden dar mejores resultados en lo que a resistencia a la compresión se refiere que los normales. El tipo de curado normal del que se habla en este ensayo es el de 28 días con una

temperatura de 27°C y una humedad relativa del 60% y el curado acelerado es que primero se sumerge en agua a 60°C durante 3 días para luego pasar 24 días con un fraguado normal. En LWC, el contenido en CV pulverizadas y HS que sustituyan al cemento portland no debe ser superior al 35%. Sin embargo, este tipo de curado con calor da peores resultados frente a la carbonatación así también la sustitución de cemento por CV pulverizadas y HS supone un peor comportamiento del hormigón frente al ataque por ion cloruro.



**Figura 19-** Relación entre la profundidad de penetración de agua y la concentración de Cloruros para hormigón normal (NWC50) y LWC (LWC50) en 3 ambientes salinos tras exposición de 2 años. [93]

## 2D2. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN FRAGUADO

Las propiedades mecánicas del hormigón fraguado son las que determinarán este material como válido para ejercer de estructura portante, estas cualidades son la resistencia a las acciones que puedan surgir en una edificación.

En este trabajo se hablará de las más importantes que definen el material que son la resistencia compresión, a tracción y módulo de elasticidad.

### 2D2A. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Ya se ha tratado anteriormente que la relación entre densidad y resistencia a compresión es muy estrecha, razón por la que resulta bastante complicado encontrar hormigones verdaderamente ligeros con resistencias a compresión similares a las de hormigones con peso normal. La mayoría de los estudios coinciden en pensar que un LWC es aquel por debajo de 2000Kg/m³ de densidad. No hay un absoluto consenso respecto a este tema. Como límite inferior de densidad se propone 1000Kg/m³, este dato procede de la literatura científica consultada en la que no es fácil encontrar hormigones de densidades en el rango de los 1000Kg/m³ y resistencia mecánica considerada estructural. Respecto a la resistencia a compresión

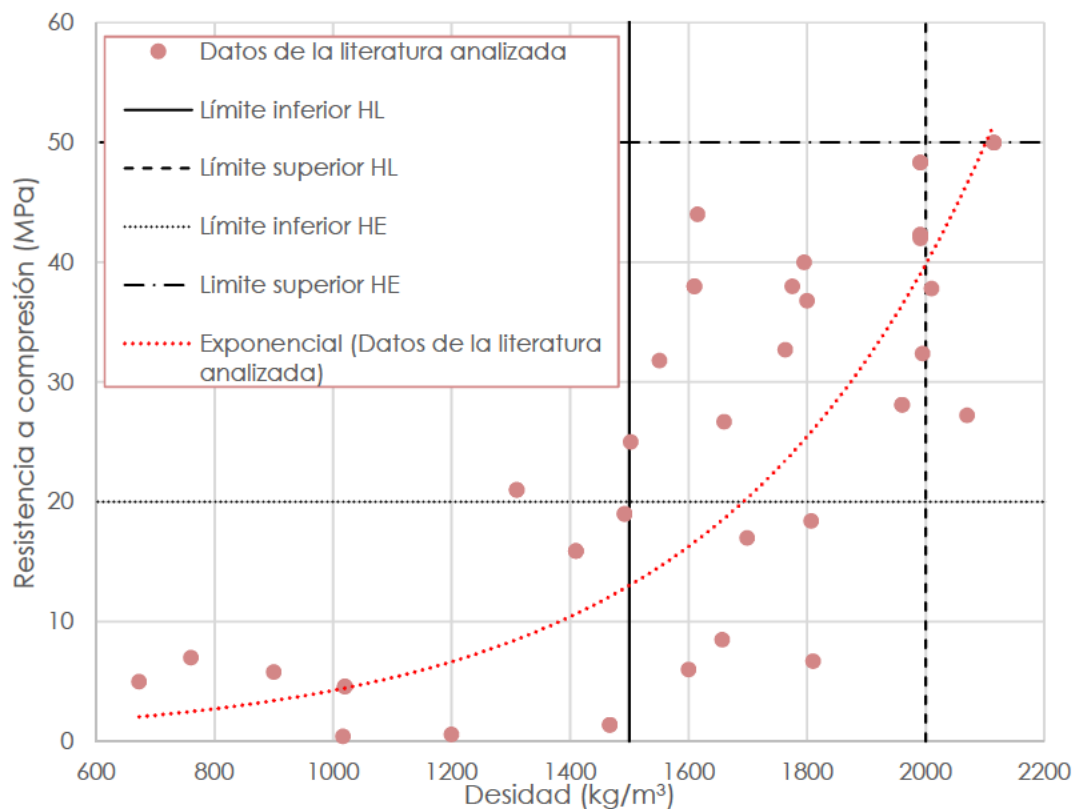


el límite superior puede tomarse como los 50MPa por encima de los cuales es complicado encontrar LWC. Como límite inferior no se describe dado que hay hormigones no estructurales que pueden tener otras aplicaciones como el aislamiento térmico y acústico o su resistencia frente a altas temperaturas.

El ACI americano considera estructural un hormigón a partir de los 17 MPa. La EHE-08, española fija como límite inferior, para hormigones estructurales, 20 MPa en el caso de hormigones en masa y 25 MPa para hormigones armados o pretensados.

En el gráfico de la **Figura 20** se presentan todos los resultados de los artículos seleccionados con relación a su densidad.

Se observa que, si bien existe una elevada dispersión, hay tendencia de a mayor densidad, mayor resistencia. Se pone de manifiesto que en la actualidad no hay unos rangos establecidos como mínimos. Esto se debe a que algunos estudios como el de Ünal, Uygunoglu y Yildiz [32], no se centran en que el hormigón estudiado tenga mayor capacidad portante para un menor peso, sino a otras propiedades como el aislamiento térmico o la durabilidad. Algunos de los resultados también provienen de la investigación sobre un nuevo LWA que no aporta al hormigón elevadas resistencia en bajas densidades pero sí pueden ser la respuesta, en determinadas áreas geográficas, a un problema medioambiental, [56, 61, 90].



**Figura 20-** Relación densidad / Resistencia a compresión de las mezclas seleccionadas

La dosificación de los hormigones según su resistencia a compresión aporta algunos datos interesantes, se divide en 4 grupos, ver **Figura 21**. El primer grupo con resistencias menores de 10MPa es casi testimonial y no aporta mucho ya que los estudios de los que están tomados suelen ser investigaciones sobre nuevos áridos

provenientes del reciclaje aún no desarrollados a nivel industrial y siempre para hormigones con uso no estructural.

La importancia del contenido de CV en el LWC parece tener bastante peso en la resistencia del hormigón y el mayor porcentaje de aditivos a la mezcla (entre el 5 y el 15%) también parece afectar.

En el apartado sobre dosificación se comentó que a menor relación  $a/cm$ , mayor es la resistencia. Este hecho no se corresponde con los datos obtenidos de la literatura técnica. La posible explicación es la necesidad de incluir en la proporción el resto de materiales cementantes. En la **Figura 22** se comparan estas dos relaciones agua/cemento ( $a/c$ ) y  $a/cm$ .

Para este gráfico se tiene en cuenta que aunque normalmente se mide la relación  $a/c$ , los aditivos con propiedades puzolánicas actúan como conglomerantes activos y se deben tener en cuenta para esta relación.

Para mejorar la respuesta mecánica de este tipo de hormigones Ben Fraj, Kismi y Mounanga [61] recomiendan la reducción de la relación  $a/c$  y el uso de SP, esto mejora la matriz cementicia compensando parte de la pérdida por el uso de los áridos obteniendo con los SP una trabajabilidad suficiente.

Dado que de los estudios seleccionados más de la mitad se centran en 3 tipos de LWA será en estos en los que se centre el trabajo, el resto hasta llegar a los 25 que aparecen en los artículos seleccionados son de uso mucho menos extendido ya que o bien proceden de experimentos y aun no se encuentran en el mercado, o bien proceden de algún material natural o proveniente del reciclado que sólo puede resultar útil en determinadas zonas geográficas muy determinadas ya que es allí donde se encuentra (diatomita, polietileno expandido modificado o cáscara de aceite de palma por citar algunos ejemplos) Así los áridos de uso expandido y asentados en el mercado español son 1: la pumita o piedra pómez, 2: la arcilla expandida y 3: árido conformado en frío con CV.

Los valores de resistencia a compresión ponen de manifiesto que por encima de 50 MPa es muy difícil encontrar LWC.

Sobre estos datos hay que tener en cuenta varios comentarios:

Las **densidades** tomadas no siempre se han calculado de la misma forma, como criterio se ha adoptado la regla de tomar las densidades de hormigón secado en horno ya que ésta será la más objetiva sin influencia de la humedad ambiente del laboratorio, después y en los casos en los que el artículo no aporta este dato se toma el de la densidad de la muestra secada al aire ambiente y por último cuando ninguno de estos datos era encontrado se toma la del hormigón fresco. La **Tabla 10** muestra los datos de los artículos. Estas variaciones pueden, según se ha calculado con las muestras que ofrecían todos los tipos de densidades, modificar los valores un  $\pm 5\%$ .

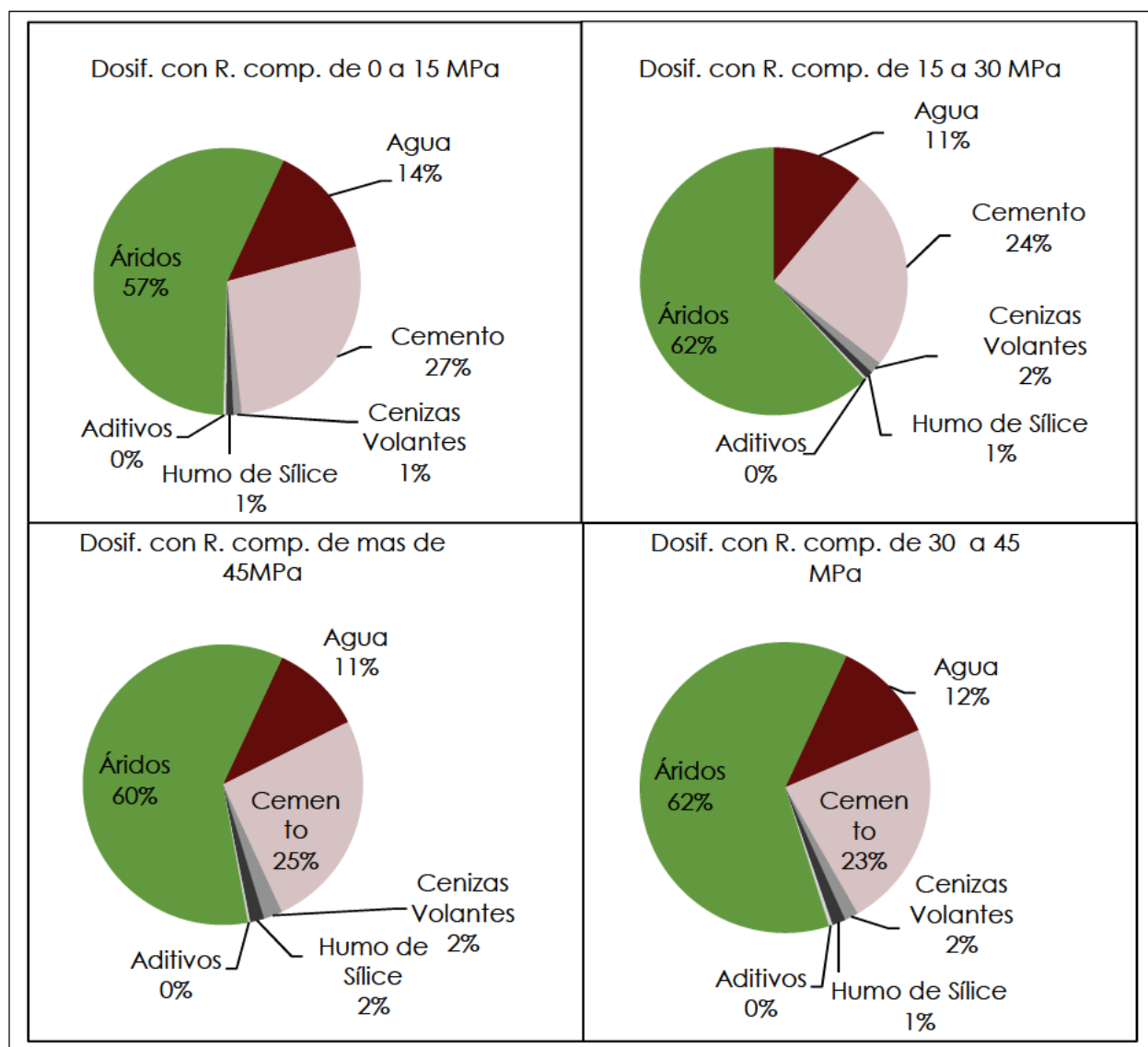


Figura 21- Dosificaciones promedio según su resistencia a compresión.

Tabla 10- Proporciones de las mezclas de LWC (en kg/m³)

Total artículos	27	100%
Artículos con datos de densidad	17	62,96%
Artículos con datos de densidad secado en horno	5	18,52%
Artículos con datos de densidad en fresco	9	33,33%
Artículos con datos de densidad secado al aire	8	29,63%

Otro dato que puede dar variaciones en las muestras son las **granulometrías** de las mezclas. Sólo un pequeño grupo de artículos aporta este dato, aun cuando estudios como el de Akcay y Tasdemir [13], demuestran su importancia.

En su estudio observan que al sustituir áridos convencionales por piedra pómez (LWA), la resistencia a compresión baja, pero lo hace mucho menos (del orden de un 15%), si se sustituyen finos y no gruesos. (Ver Tabla 11). También se observa que el hormigón se hace más dúctil al sustituir los áridos.

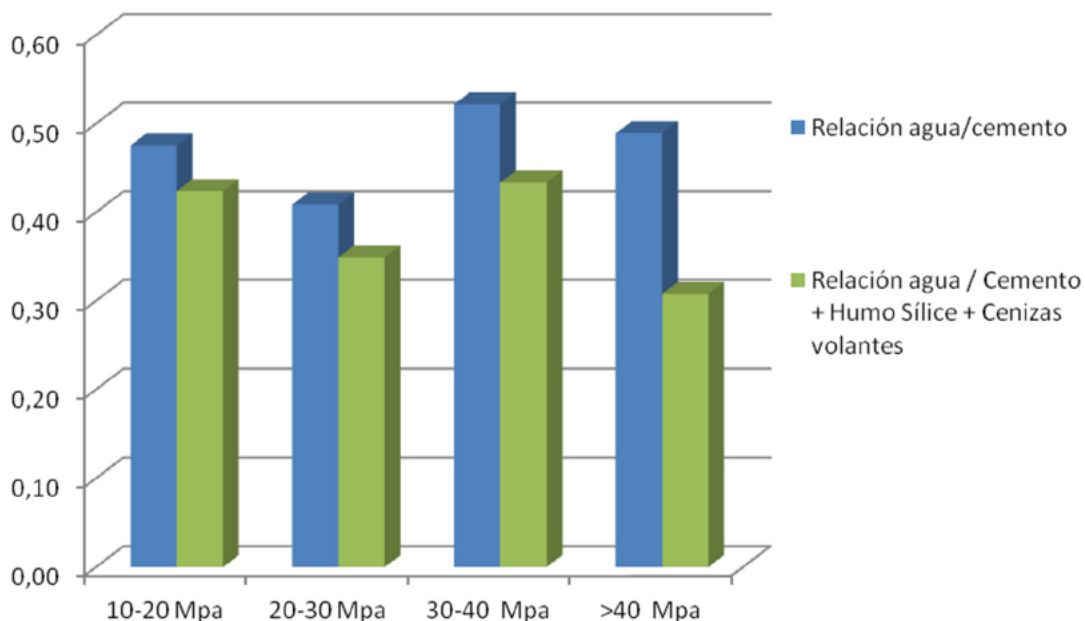


Figura 22- Comparativa de la relación a/c y a/cm

Tabla 11 - Proporciones de las mezclas, granulometrías y resistencia a compresión de LWC. [13]

Mezcla	CREF	CV10L24	CV20L24	CV30L24	CV10L48	CV20L48	CV30L48
Cemento *	497	496	497	496	497	496	496
Humo Sílice *	50	50	50	50	50	50	50
Agua *	153	153	153	153	153	153	153
Arena Fina (0 - 0,25 mm) *	169	169	169	169	169	169	168
Arena (0 - 2 mm) *	514	513	513	513	514	513	512
Caliza machacada (4 - 8 mm) *	520	344	173	0	520	519	518
Pumita (2 - 4 mm) *	0	48	97	145	0	0	0
Pumita (4 - 8 mm) *	0	0	0	0	47	94	141
Reductor de agua *	10	10	10	10	10	10	10
Agua pre-humedecido *	0	17	34	51	16	31	47
Aire (%) *	1.4	1.5	1.3	1.2	1.2	1.3	1.4
Peso *	2441	2328	2224	2115	2328	2211	2095
R. Compresión (MPa)	93	79	62	50	68	61	48

(\*) en Kg/m<sup>3</sup>

Otro ejemplo de importancia de las granulometrías es el estudio de Miled, Sab y Le Roy [99] con hormigones que contienen poliestireno expandido (EPS) como LWA. Su estudio toma tres hormigones en los que sólo varía la granulometría del EPS (ver [Imagen 7](#)). La resistencia a compresión de la mezcla con EPS de menor granulometría es un 50% superior al de LWA de mayor tamaño. Con el módulo de elasticidad no se observan variaciones significativas (ver [Figura 23](#)). A este efecto lo denominan del "tamaño de grano".



La rotura a compresión de los testigos ocurre en dos fases, la primera es inicial por micro-roturas gobernada por la macro-porosidad del hormigón seguida de una segunda fase de micro-rotura y/o macro rotura de propagación; el efecto "tamaño de grano" tiene lugar en la segunda fase y es la que interfiere en que sea la micro o la macro rotura. Este efecto hace que el menor tamaño de grano tenga mayor resistencia a compresión y que este efecto sea más acentuado en hormigones poco porosos con rotura casi frágil y resulte casi imperceptible en hormigones muy porosos con comportamiento más dúctil. Este efecto se puede predecir con un coeficiente de fragilidad que es único para cada árido, hormigón y diámetro de grano.

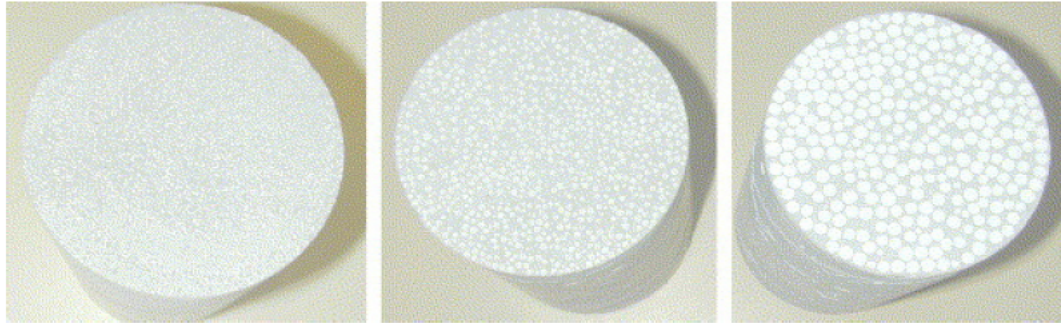


Imagen 7- Cilindros de hormigón con EPS que contienen granos de 1 mm, 2.5 mm y 6.3 mm respectivamente. [99]

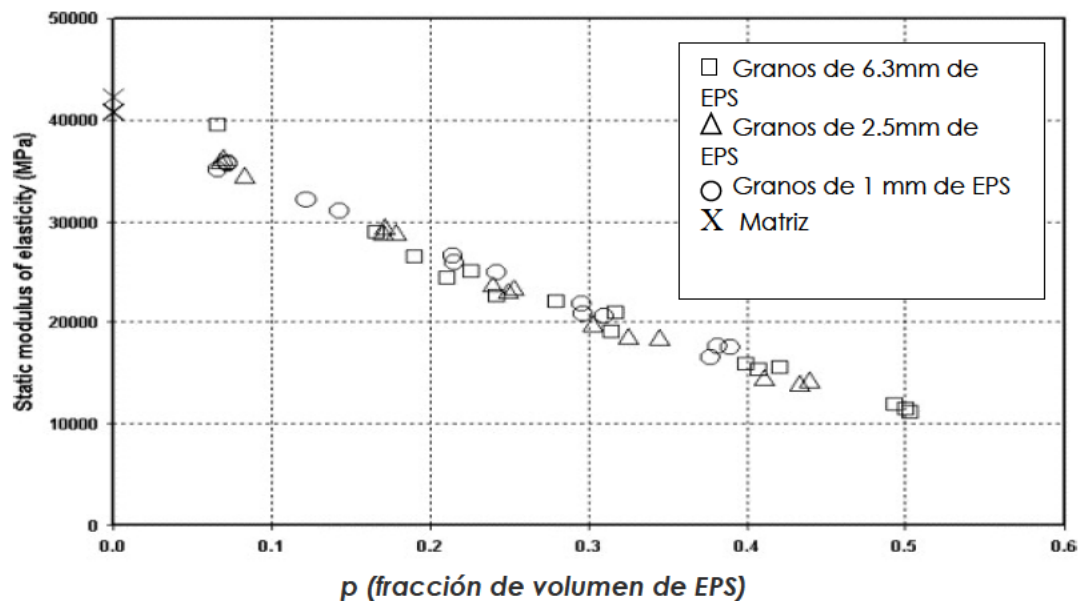


Figura 23- Variación del módulo de elasticidad del hormigón con EPS respecto de la (macro) porosidad ( $p$ ), para cada tamaño de grano de EPS. [99]

- La **forma del testigo** en los ensayos de resistencia tampoco es homogénea, si bien la gran mayoría optan por testigos de forma cilíndrica (que se ha demostrado el más apropiado), no todos los utilizan y en algunos artículos no se comenta la forma del testigo. Como puede observarse en la **Tabla 12** hay diversidad en la forma y tamaño de los testigos, en general hay división entre cilindro y cubo y un pequeño porcentaje de prismas. Los cubos son en su gran mayoría de 100mm, aunque algunos son de 150mm y los cilindros varían entre los 100 x 200mm y los 150 x 300mm.

Tabla 12- Condiciones de curado en los hormigones de los artículos seleccionados

Método de compactación	forma del testigo COMPRESIÓN	Nº <sup>a</sup>
Vibrado	Cilindro de 300mm de H y 150mm Ø.	[8]
Vibrado	Cilindro de 300mm de H y 150mm Ø.	[8]
-	Cilindro de 200mm de H y 100mm Ø.	[9]
-	Cilindro de 200mm de H y 100mm Ø.	[9]
-	Prisma de 100x100x500 mm	[13]
-	Prisma de 100x100x500 mm	[13]
-	Cubo de 100x100x100 mm	[11]
	Cubo de 100x100x100 mm	[12]
	Cubo de 100x100x100 mm	[14]
	Cubo de 100x100x100 mm	[21]
-	Cilindro de 300mm de H y 150mm Ø.	[15]
-	Cilindro de 300mm de H y 150mm Ø.	[15]
-	Cubo de 100x100x100 mm	[18]
-	Cubo de 100x100x100 mm	[18]
-	Cubo de 100x100x100 mm	[1]
-	Cubo de 100x100x100 mm	[1]
Vibrado	Cilindro de 200mm de H y 100mm Ø.	[22]
Vibrado	Cilindro de 200mm de H y 100mm Ø.	[22]
-	Cilindro de 320 mm de H y 160mm Ø.	[24]
-	Cilindro de 320 mm de H y 160mm Ø.	[24]
Vibrado	Cubo de 150x150x150 mm	[16]
	Cilindro de 320 mm de H y 160mm Ø.	[89]
	Cubo de 100x100x100 mm	[21]
	Cubo de 150x150x150 mm	[91]
	Cubo de 150x150x150 mm	[23]
	Prisma de 40x40x160 mm	[100]
Varilla y vibradora	Cilindro de 200mm de H y 100mm Ø.	[26]
	Cilindro de 300mm de H y 150mm Ø.	[27]
	Cilindro de 200mm de H y 100mm Ø.	[28]
	Cubo de 100x100x100 mm	[93]
	Cubo de 100x100x100 mm	[94]
	Cubo de 100x100x100 mm	[30]
	Cilindro de 200mm de H y 100mm Ø.	[31]
	Cilindro de 200mm de H y 100mm Ø.	[29]

a: Corresponde con N.º de artículos de la tabla 17

- Las **condiciones del curado**; ya se ha tratado anteriormente, son muy influentes en las propiedades mecánicas y varían en los estudios, estas condiciones afectan tanto a las condiciones de humedad y temperatura durante el curado como al tiempo en el encofrado o el curado con testigo sumergido en agua. Como ya se trató en la tabla 29, no todos los estudios definen las condiciones del curado y de las que lo hacen no hay consenso entre curar al aire o con el testigo sumergido. Si suelen desencofrar a las 24 horas y la temperatura varía entre los 20 y 25°C. Cuando el curado se produce en seco la humedad relativa también oscila entre el 30% y el

95% lo que lleva a pensar que no se le suele dar importancia. Sí es importante considerar el hecho de que en el algún caso las condiciones del curado están justificadas en el motivo del estudios como es el caso de ensayos para determinar el comportamiento de los hormigones "in situ" en ambientes calurosos y salinos, (es el caso de Haque y Al-Khaiat [93] y Maltais *et al.* [92]. Merece la pena comentar que la gran mayoría de las mezclas combinan el LWA con la arena, esto suele ocurrir porque tanto la arcilla expandida como los AACV conformados en frío tienen granulometrías limitadas careciendo de finos, en este caso la pumita sí permite más variedad de tamices siendo la mayoría de las mezclas que las usan éste el árido único. Esta es una posible explicación al porqué siendo la pumita un material con, en principio, peores prestaciones que los otros áridos creados expresamente para este fin, ofrecen valores finales de densidad/resistencias similares al resto.

Resulta llamativo el hecho de que los AACV conformados en frío no tengan resultados notablemente mejores, siendo éste un material que tiene amplias capacidades puzolánicas y que de hecho su uso más común es el de aditivo para mejorar las propiedades del hormigón. Una solución a priori fue pensar que en los AACV habría más porcentaje de arena, pero la relación arena/árido es mayor cuando se utiliza la arcilla expandida, por lo tanto, esto no es explicación.

La relación árido/cemento es un 50% mayor con las CV; al tener mucho más cemento las mezclas con arcilla expandida las propiedades mecánicas de estas mezclas se igualan pese a ser las arcillas un material casi inerte para el hormigón.

## **2D2B. RESISTENCIA A TRACCIÓN**

De los artículos seleccionados con los tipos de árido descritos anteriormente se puede relacionar la resistencia a tracción con la resistencia a compresión en la **Figura 24**.

Se puede observar que el rango en el que se mueven este tipo de hormigones es de entre 2,5 y 4,5 MPa indistintamente del árido que se use. Desafortunadamente pocos artículos aportan el dato de la resistencia a tracción y aún menos aportan ambos (con la densidad) por esta razón la muestra es pequeña, pero con ellos se puede pensar que los áridos no influyen mucho en la resistencia a tracción.

Metin [101], en su estudio se centra en estudiar la resistencia a compresión y flexión (y la relación entre ellas) pero incidiendo en las uniones entre fases, distinguiendo para ello entre árido, mortero y pasta de cemento comparando las uniones entre ellas del LWC con NC. Para ello toma como LWA la Dacita (toba volcánica) y piedra caliza para el árido de peso normal.

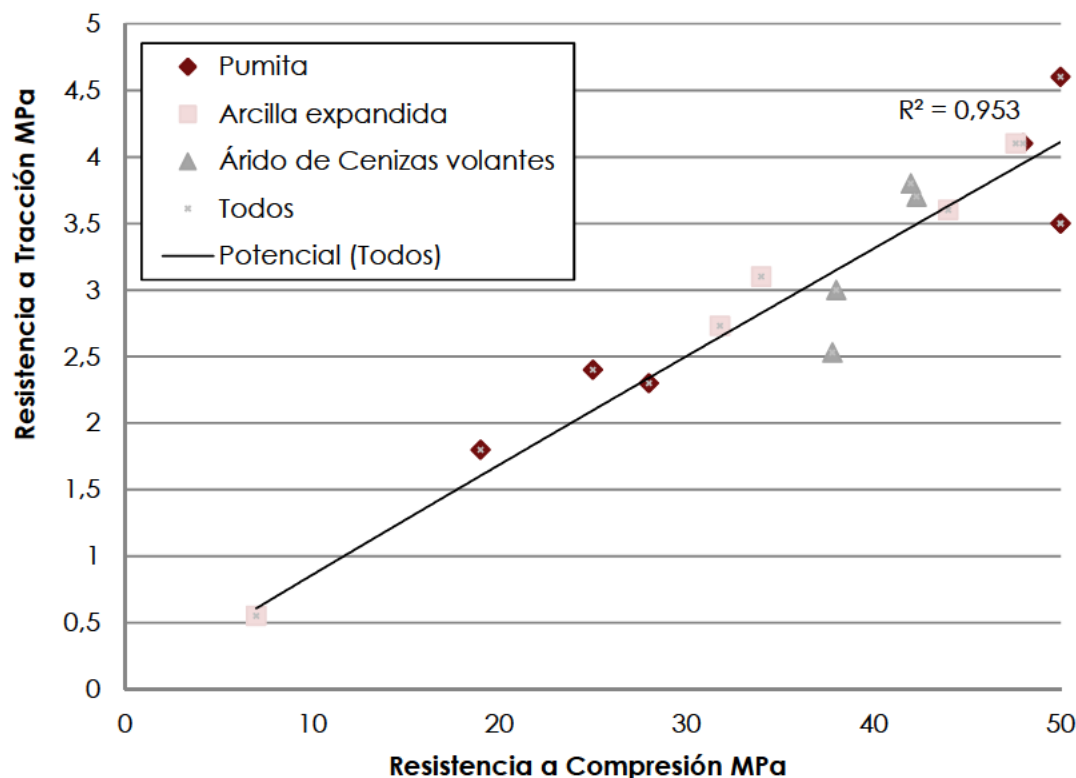


Figura 24- Relación Densidad/Resistencia a Tracción distinguiendo los 3 tipos de áridos

El estudio determina que la resistencia a la flexión de los áridos tradicionales es un 18% mayor que la del hormigón con LWA y la resistencia a compresión un 58% mayor, y llega a la conclusión, comparando hormigones con distintos áridos, que cuanto mayor resistencia tenga el árido por sí mismo, mayor será la unión con el cemento y por ende mayor será la del hormigón ya que cuanto más diferencia haya en las propiedades mecánicas, entre el cemento y el árido, más tensión se concentrará en el nexo y habrá más micro-roturas.[101]. La unión entre árido y pasta de cemento es 2.5 veces mayor que con árido normal, pero entre árido y mortero la del ligero es 38% menor que la del normal y la unión LWA mortero es un 20% menor que LWA pasta de cemento, y la unión del normal con mortero es un 64% menor que con pasta de cemento. (Ver **Tabla 13** y **Tabla 14**)

Tabla 13- Resistencias a tracción y compresión de los testigos experimentados. [101]

Testigos del experimento	Resistencia a tracción(MPa)	Desviación estándar(MPa)	Resistencia a compresión(MPa)	Desviación estándar(MPa)
Piedra ligera	11	0.6	62	2.6
Piedra convenc.	13	0.9	98	9.6
Pasta de cem.	1.6	0.2	29	2
Mortero con LWA	3.8	0.3	21	1.4
Mortero con OA	5	0.4	35	2

LWA: LWA; OA: árido convencional.



Tabla 14- Resistencias de los vínculos árido-mortero y árido-pasta. [101]

Testigos del experimento	Resistencia del vínculo (MPa)	Desviación estándar (MPa)
LWA -mortero	0.8	0.1
Árido convencional -mortero	1.1	0.2
LWA- Pasta de cemento	1	0.1
Árido convencional - Pasta de cemento	0.4	0.1

## 2D2C. MÓDULO DE ELASTICIDAD

Se comenzará, como en anteriores puntos, comentando los resultados de los gráficos de la **Figura 25**, en los que se relacionan el esfuerzo mecánico a tratar, en este caso módulo de elasticidad, con la densidad como principal característica de los LWC.

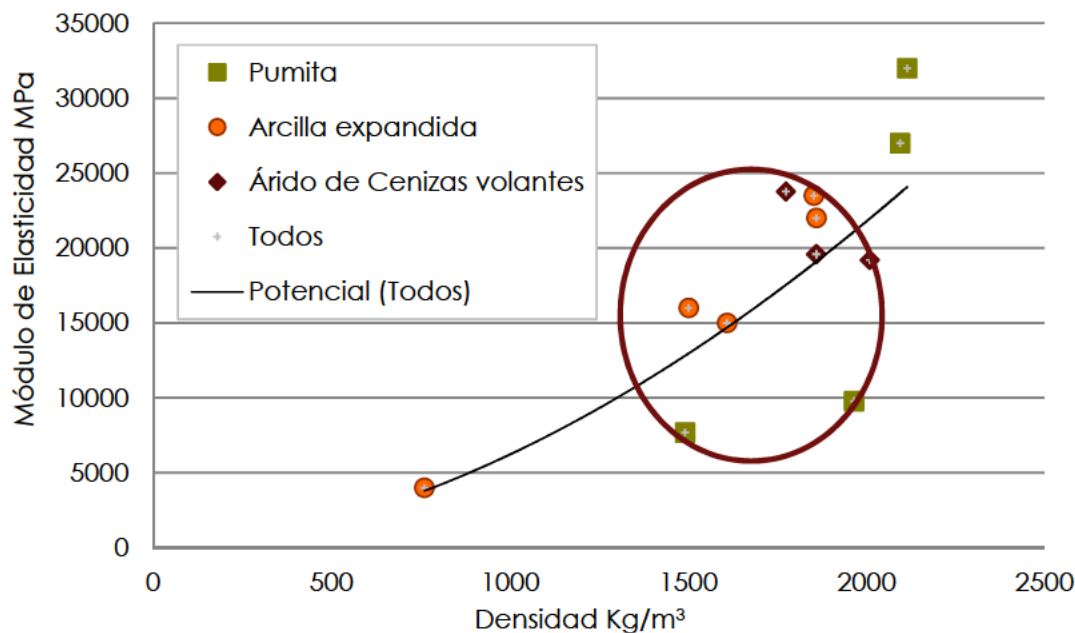
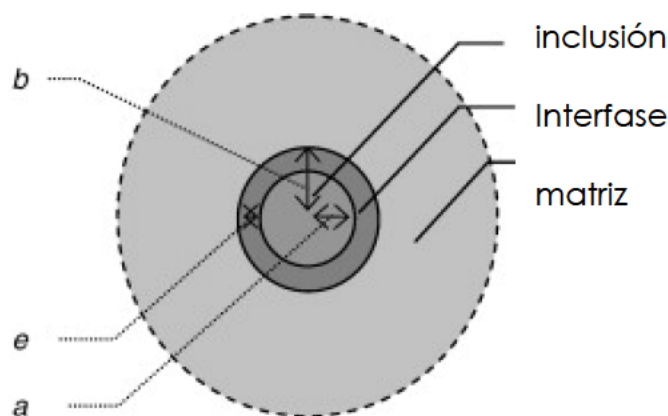


Figura 25- Relación módulo de elasticidad / Densidad

Los datos de módulos de elasticidad arrojan resultados parecidos a los de la tracción y compresión, los hormigones con AACV y arcilla expandida son más homogéneos que los de la pumita y la mayoría se agrupan en un rango concreto, en este caso entre 10 y 25 GPa. Sin embargo se plantea en Lo, Tang, y Cui [91] que el comportamiento elástico de los LWA es difícil de medir de manera experimental ya que ya que los ensayos mecánicos como el ensayo uniaxial de compresión o el ultrasónico necesitan pulir el grano; el pulido retira la concha exterior del grano lo que reduce las propiedades elásticas del árido. Por esta razón Ke *et al* (2010) investigan un doble acercamiento a través de la experimentación y la modelización numérica, el objetivo del estudio es identificar las características micro-estructurales del LWC (módulo de Young del árido, módulo de Young del hormigón y espesor de la ITZ). Con el apoyo de un microscopio de escaneo electrónico se identifican las zonas

del hormigón, como la modelización de la **Figura 26** y luego de modelizan matemáticamente, de esta manera se llegará a conocer mejor el comportamiento elástico del LWC.

La elasticidad puede ser un dato que aporte más información del mero cálculo resistente de las estructuras, también interviene en la durabilidad, sobre este tema en Liu, Chia, y Zhang [19] se habla de que la diferencia entre los módulos de elasticidad de los áridos y el cemento provoca que ante una gran carga se produzcan micro-roturas en la zona interfacial. Éstas pueden ser dañinas si llegan a interconectarse ya que permiten el paso de sustancias que provoquen el ataque químico y se reduzca notablemente la durabilidad. También en Metin [101] se plantea lo negativo de que cemento y árido tengan resistencias muy distintas. Existe una relación lineal entre la resistencia a compresión del hormigón y la resistencia del árido, la de la pasta cementosa y la del ITZ pero esta relación varía cuando se varía el tipo de árido o la mezcla. Cuanto más resiste el árido más resiste el hormigón y cuanto más diferencia hay en las propiedades mecánicas de la pasta de cemento y del árido, más concentración de tensión hay en el ITZ y por lo tanto más fragilidad del hormigón y más micro-roturas.



**Figura 26** - Esquema del modelo de ITZ. [91]

$a$ : radio de inclusión,  $e$ : espesor de la interfase y  $b$ : radio exterior de la inclusión rodeado por la interfase.

Normalmente se tiende a pensar que los áridos sólo influyen en la densidad y no en las propiedades mecánicas, aunque recientes estudios demuestran que sí puede intervenir. Debido a su mayor porosidad los LWA tienen menos resistencia y son más deformables que los áridos comunes. El componente más débil del hormigón no es la matriz de conglomerado o la zona de transición interfacial sino los áridos que intervendrán según sus propiedades y volumen. [24]

En su estudio con 6 tipos de áridos, tomando pizarra y arcilla expandidas de diferentes propiedades demuestran que en algunos casos los áridos serán el punto débil del hormigón. Toman áridos de distintas granulometría y densidad aparente resultando que los áridos con densidades aparentes menores marcan la resistencia a compresión del hormigón mientras que en áridos con densidades más altas es la matriz cementosa la que romperá antes, también demuestran que en estos últimos áridos cuando se aumenta el volumen de árido no desciende la resistencia a compresión a diferencia del NC, dado que el que en hormigones de peso normal, el

descenso de la resistencia al aumentar el volumen de árido se debe a la débil unión entre árido y matriz se demuestra que con los áridos de pizarra expandida con alta densidad, la unión matriz-árido es especialmente resistente, esto se puede deber a una mayor compatibilidad elástica a una menor y menos porosa zona interfacial y a una porosidad más baja. (Figura 27).

La absorción de agua de los áridos viene a actuar como una síntesis de varios parámetros como el espesor del recubrimiento, la macro-porosidad o el porcentaje de granos rotos y estos son datos que tienen influencia en el comportamiento final de hormigón. (Figura 28)

En áridos con densidad menor de  $1000 \text{ Kg/m}^3$ , el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión se ven seriamente afectados por la dosificación de áridos, en áridos con densidades entre  $1430$  y  $1570 \text{ Kg/m}^3$ , el incremento de volumen de árido utilizado influye en la reducción del módulo de elasticidad pero no afecta a la resistencia a compresión de los hormigones [24]

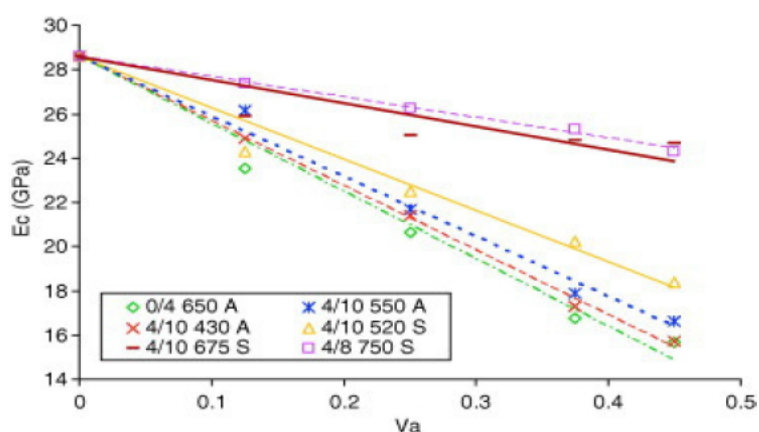


Figura 27- relación entre el módulo de Young del hormigón y la fracción de volumen de LWA. [24]

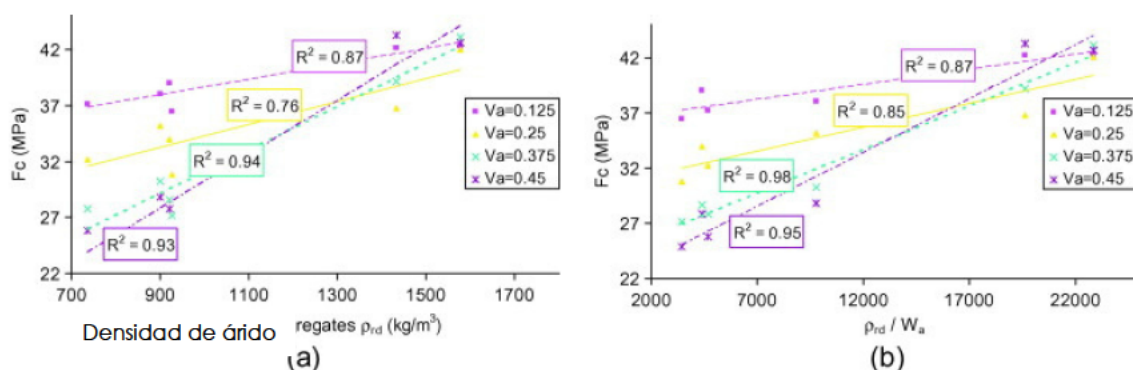


Figura 28- Resistencia a compresión del hormigón versus densidad de partícula de árido (a) y versus densidad a ratio de absorción de agua ( $\rho_{rd}/W_a$ ) (b). [24]

Estudios como el de Kiliç *et al* [8] demuestran que los LWC pueden reducir el peso propio en un 20% lo que supone una importante reducción en los daños ante terremotos así como tener una alta resistencia si se combinan con adiciones minerales (CV o HS), llegando a  $40 \text{ MPa}$  con LWA de piedra pómez basáltica. Los datos de los hormigones se muestran en la Tabla 15 y los resultados en la Figura 29.

Tabla 15 - Composición aproximada de hormigones (kg) y densidades (kg/m<sup>3</sup>) de un metro cúbico de hormigón. [8]

Componentes del hormigón					Granulometrías (tamaño de grano en mm)							Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	
Mezcla	Cem	Ceniz. Volan	Hum. Sílice	Agua	8-16	4-8	2-4	1-2	0.5-1	0.25-0.5	0-0.25	Fresco	Secado al aire
M1	500	0	0	275	300	250	175	125	150	150	100	1955±29	1860±23
M2	400	100	0	275	300	250	175	125	150	150	100	1932±21	1850±18
M3	450	0	50	275	300	250	175	125	150	150	100	1944±25	1820±28
M4	350	100	50	275	300	250	175	125	150	150	100	1913±36	1800±31
CM1	500	–	–	275	390	325	225	165	195	195	130	2330±56	2260±45
CM2	500	–	–	225	390	325	225	165	195	195	130	2380±47	2290±37

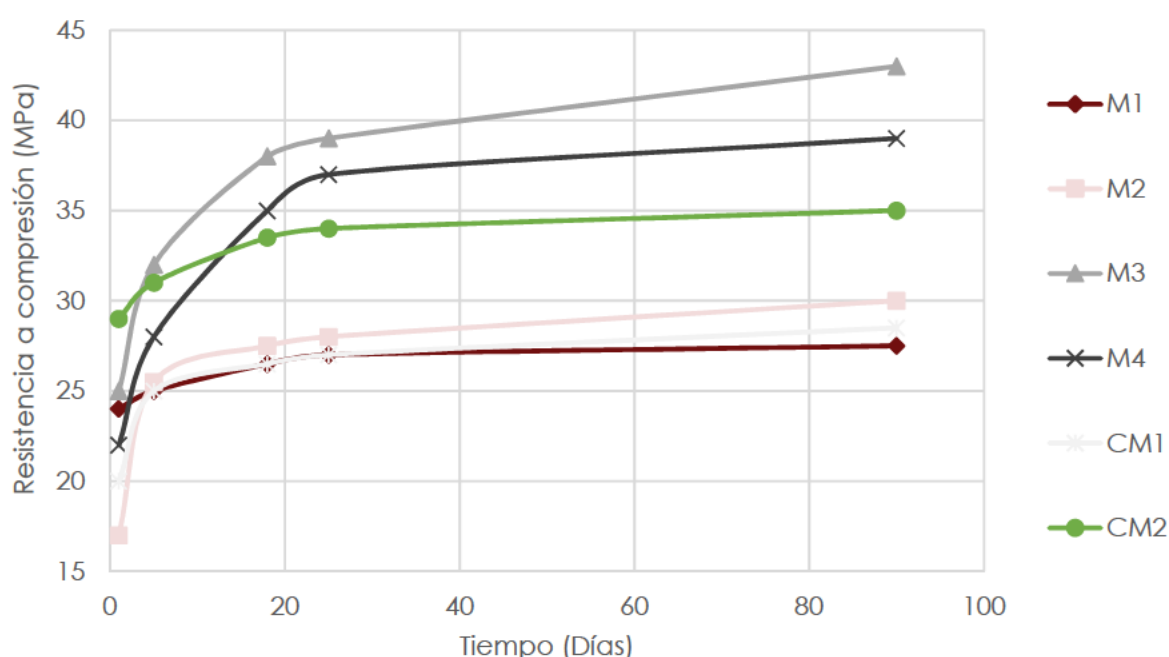


Figura 29- Resistencia a compresión del hormigón. [8]

El estudio de A. Kiliç et al. [8] apunta una dosificación de adiciones minerales con determinados áridos para obtener hormigones de bajo peso y resistencia elevada.

Otro de los puntos de estudio ya mencionado brevemente anteriormente, como puntos frágiles del hormigón, es la unión entre árido y mortero, también llamada zona interfacial o ITZ, en este punto, tradicionalmente se tendía a pensar que la resistencia de esta unión dependía únicamente de la rugosidad de la superficie, sin embargo en estudios posteriores se demostró que la clave estaba en la reacción química entre árido y mortero y la resistencia del árido, desde ese momento la atención a estas reacciones se incrementó, de hecho si la porosidad fuera la clave, los LWA tendrían más resistencia y sin embargo es justo lo contrario.

También se le daba a esta unión la responsabilidad de la resistencia a cortante del hormigón, pero está demostrado que esta resistencia depende mucho más del tamaño máximo de los gruesos que de la naturaleza de estos. [15], aunque para el



mismo tamaño máximo de árido siga teniendo más resistencia el hormigón común. (Ver Tabla 16 y Figura 30)

Tabla 16- Detalles de los testigos de ensayo y proporciones de la mezcla. [15]

Testigo	Tipo de Hormigón	Ta (mm)	a/c	f/t	Unidades <sup>a</sup> (kg/m <sup>3</sup> )					Cap. Carga
					W	C	SF	F	G	
A4	Todo LWA (ALWC)	4	0.4	–	139	348	0	1043	0	1,897
A8		8	0.36	0.4	222	548	61	320	439	2,292
A13		13	0.35		212	545	61	327	448	2,719
A19		19	0.30		173	518	58	326	447	2,656
S4	Arena-LWA (SLWC)	4	0.52	–	260	495	0	1486 <sup>b</sup>	0	2,143
S8		8	0.35	0.4	198	569		634 <sup>b</sup>	474	2,764
S13		13	0.36		203	556		633 <sup>b</sup>	473	2,717
S19		19	0.33		171	525		625 <sup>b</sup>	467	2,890
N4	NC	4	0.50	–	250	502		1505 <sup>b</sup>	0	2,287
N8		8	0.65	0.4	201	309		715 <sup>b</sup>	1097 <sup>b</sup>	2,936
N13		13	0.63		193	309		723 <sup>b</sup>	1110 <sup>b</sup>	3,503
N19		19	0.60		186	309		731 <sup>b</sup>	1122 <sup>b</sup>	3,565

Nota: Ta = Tamaño máximo de árido, a/c= Relación agua/cemento, f/t= Relación áridos finos/total de áridos por volumen

<sup>a</sup> W,C,SF,F y G se refiere a agua, cemento, HS, áridos finos y áridos gruesos

<sup>b</sup> indica peso de árido convencional natural

Otros estudios señalan a que la resistencia de la zona interfacial tiene que ver no solo con el árido sino también del tipo de cemento. Imágenes con microscopio electrónico demuestran que el espesor y la porosidad de la zona interfacial dependen del tipo de árido, del tipo de cemento y de la relación a/cm. En la **Figura 31** se pueden observar las ITZ de un hormigón. Cuanto más delgada sea esta zona mayor resistencia tendrá el hormigón. En hormigones con arcilla y pizarra expandidas cuanto más porosos sean mejor ya que el cemento entra por estos poros y la unión es más fuerte. [89]. Cuanto más alta sea la relación a/cm más poros habrá en la zona interfacial y por lo tanto menos resistencia tendrá el hormigón [91]. Sin embargo, una cierta cantidad de agua, suficiente para hidratar el árido sí es beneficiosa y mejora la resistencia ya que el agua retenida en el árido puede hidratar lentamente el hormigón obteniendo mejores resultados.

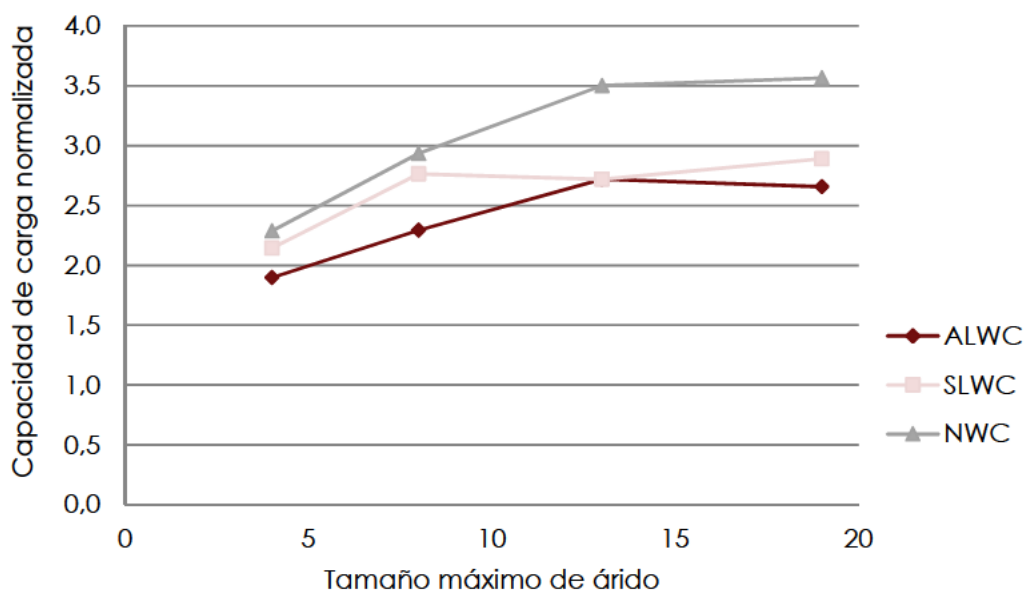


Figura 30- Efecto del tamaño de árido en la capacidad normalizada de carga. [15]

El estudio de las características de la zona interfacial se suele hacer con microscopios de altas prestaciones, por ejemplo, los microscopios electrónicos de barrido dotados con detector de retro-dispersión de electrones y con detector de rayos X por dispersión de energías. Con ellos se es capaz de estudiar el espesor o la homogeneidad de la ITZ, por ejemplo, gracias a este tipo de instrumentos se ha podido demostrar que la superficie porosa de la arcilla expandida mejora los vínculos de la ITZ, que el "efecto pared" que ocurre con el hormigón de peso normal no existe en este tipo de áridos por lo que la ITZ mide entre 5 y 10  $\mu\text{m}$  lo que es mucho menos que en los áridos normales, también se puede observar que hay una red de ettringita de entre 0.3 y 1  $\mu\text{m}$  en la ITZ que es mayor que los huecos capilares pero más pequeña que las bolsas de aire atrapado en la pasta de cemento que pueden debilitar la resistencia del LWC. [23]. (Ver **Imagen 8**)

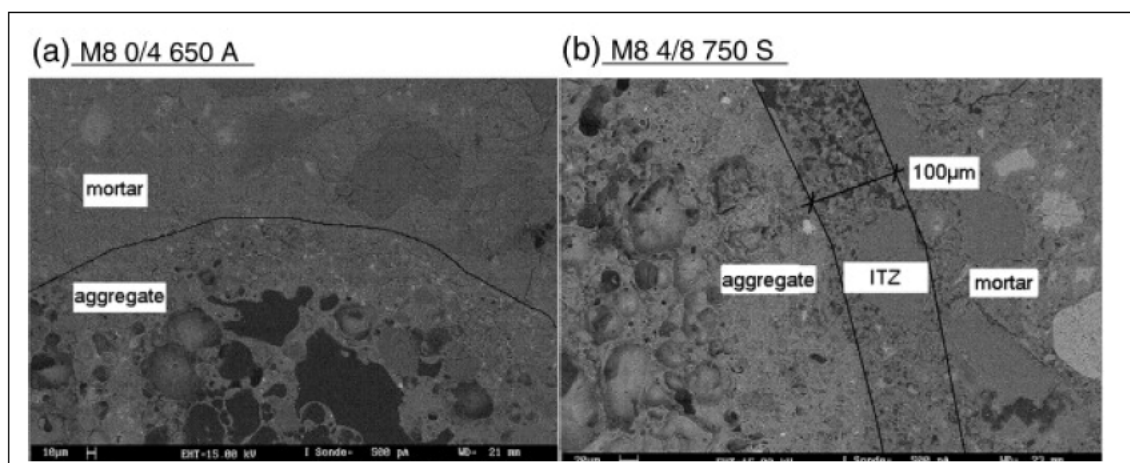


Figura 31- Vista de la interfase mortero/árido con microscopio electrónico de escaneo. [89]

En la literatura científica, uno de los análisis de resultados para determinar la respuesta de la ITZ de los distintos tipos de hormigón es el MANOVA o análisis

multivariante de la varianza que dentro del campo de la estadística es un análisis para cubrir los casos donde hay más de una variable dependiente que no pueden ser combinadas de manera simple.

Así por ejemplo en un estudio para conocer cómo influye el tipo de árido en las propiedades de mecánicas del hormigón se elige la familia de áridos (AACV peletizados en frío) se toman varios tipos dentro de ella (distintas relaciones cemento/CV) y se hacen varios hormigones (distinta relación  $a/cm$ , con distintas cantidades de SP, con distinto volumen de áridos respecto del total de hormigón, etc.) se hacen ensayos para conocer su respuesta y con este análisis se puede estudiar y comparar la importancia de cada cosa en la respuesta final del hormigón llegando a la conclusión de que la relación  $a/cm$  y las propiedades del árido son determinantes para la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad, así como que cuando el volumen de áridos el 18% la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad prácticamente sólo dependen de la relación  $a/cm$ . [29]



Imagen 8- Árido poroso entrelazado con pasta de cemento por la interfase [23]

## 2D3. ESTABILIDAD DIMENSIONAL

### 2D3A. RETRACCIÓN DEL HORMIGÓN

La retracción del hormigón es una pérdida de volumen que se expresa como una deformación no instantánea, porque depende del tiempo y lineal porque la mayoría de los elementos estructurales tienen una o dos dimensiones mucho menores que la tercera y el efecto de la retracción es mayor en la dimensión más grande. Dicha pérdida de volumen genera tensiones internas de tracción que dan lugar a las fisuras de retracción. Se pueden distinguir cinco tipos de retracción dependiendo de las circunstancias que la provoquen.



- **Retracción plástica;** cuando el hormigón pierde humedad tras la colocación y antes de entrar en carga. El agrietamiento depende de la temperatura del aire, la humedad relativa, la temperatura del cemento y la velocidad del viento.

- **Retracción por secado;** involucra el movimiento y la pérdida de agua dentro de los poros de la pasta hidratada de cemento y desde el interior de la estructura de los productos de hidratación o gel. A medida que el hormigón en servicio se seca, pierde humedad creando huecos. La tensión superficial del agua asociada a estos huecos atrae los poros uno hacia el otro y da como resultado pérdida de volumen.

La menor cantidad de árido suele suponer una mayor retracción al fraguar ya que ésta depende de la relación **a/cm** que tenga el hormigón [142] . Los LWC con espumante suelen tener baja relación **a/cm**. Los agentes reductores de retracción suelen funcionar mal en el LWC porque tienden a reducir la cantidad de aire de la mezcla. Esto produce un aumento de la densidad del hormigón. El aumento de densidad hace que se necesite más agente espumante. Niveles demasiado altos de espumante reducen la resistencia del hormigón [98].

Gesoglu, Özturan, y Güneyisi [30] ponen de manifiesto que los valores de retracción por secado de un hormigón de peso normal a los 60 días suelen estar entre 200  $\mu\text{m}$  y 800  $\mu\text{m}$ , mientras que la retracción de un mortero común está entre 800  $\mu\text{m}$  y 2000  $\mu\text{m}$ .

En el caso de los AACV conformados en frío, Gesoglu, Özturan, y Güneyisi [30] han experimentado que los hormigones con áridos más resistentes tienen una menor retracción y más resistencia a la tracción. Las deformaciones por retracción son mucho menores que la mejora en el módulo elástico.

La resistencia a la fluencia en el árido del hormigón produce un aumento en la retracción. También en hormigones con similares niveles de absorción de agua, la retracción es más baja cuanto más resistente es el árido, pero en áridos con resistencias parecidas tienen menos retracción los que tienen menor absorción de agua. Incrementando la relación **a/cm** se reduce notablemente la retracción. Para mejorar la retracción también resulta beneficioso aplicar tratamientos superficiales a los áridos con vidrio soluble (silicato sódico).

Las proporciones de las mezclas se muestran en la **Tabla 17** y los resultados del ensayo en la **Figura 32**.

**Tabla 17-** Dosificación de LWC (en  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) [30]

Mix no.	a/c	LWA tipo	Cem.	Agua	SP <sup>a</sup>	LWA <sup>b</sup>	Arena Natural	Arena Nat. Ma-chacada	Densid. en fresco
NSA035	0.35	NSA	549.5	192.3	11.0	486.5	603.2	258.5	2101
WGCA035		WGCA	545.5	190.9	10.9	502.0	598.9	256.7	2105
SIA035		SIA	546.8	191.4	10.0	484.1	600.4	257.3	2090

Mix no.	a/c	LWA tipo	Cem.	Agua	SP <sup>a</sup>	LWA <sup>b</sup>	Arena Natural	Arena Nat. Ma-chacada	Densid. en fresco
NSB035	0.55	NSB	546.9	191.4	10.5	465.1	600.4	257.3	2070
NSA055		NSA	399.4	219.7	2.5	508.9	631.0	270.4	2032
WGCA055		WGCA	396.9	218.3	2.5	525.2	626.6	268.5	2038
SIA055		SIA	399.2	219.6	2.5	528.2	630.3	270.1	2050
NSB055		NSB	402.7	221.5	2.5	475.2	635.7	272.4	2010

<sup>a</sup> SP <sup>b</sup> AACV

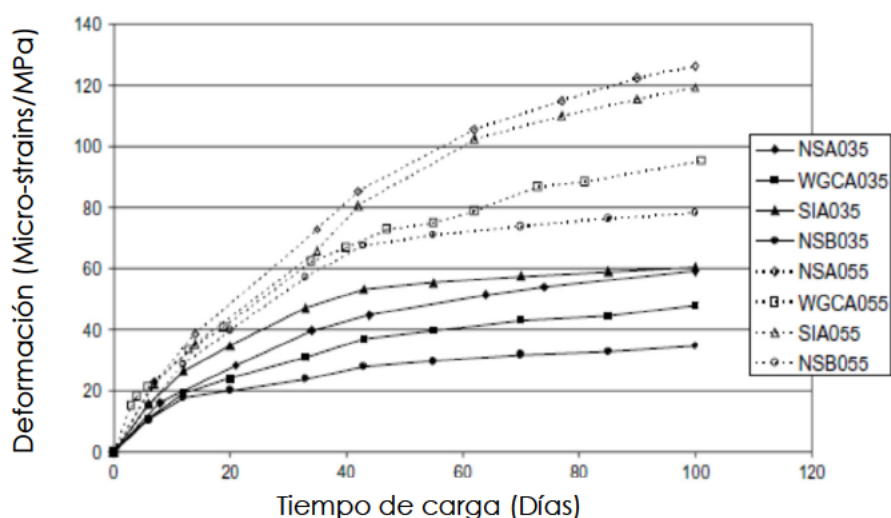


Figura 32- Deformación en hormigones con distintos LWA [30]

Chindaprasirt y Rattanasak [98], en su estudio acerca de la retracción en el hormigón con espumantes, estudian el comportamiento de los compuestos con glicol. Estos tienen propiedades reductoras de la tensión superficial, y, por tanto, beneficiosa contra la retracción por secado. Entre los compuestos con glicol más utilizados están los éteres tert-butilo de dipropileno glicol (DPTE), el glicol de tri-etileno (TEG) y el glicol de propileno (PG). De los tres el DPTE es el que mejores resultados ofrece para la reducción de la retracción, pero tiene un efecto negativo sobre la estabilidad del espumante y la trabajabilidad, los TEG y PG dan resultados razonables y apenas causan efecto en la resistencia y densidad. Las CV también dan buenos resultados en la mejora de las propiedades durante el fraguado, entre ellas la de la reducción de la retracción. Las proporciones de las mezclas se muestran en la **Tabla 18** y los resultados en la **Figura 33**.

Retracción autógena; ocurre dentro de la masa del hormigón, esto es, sin contacto con el medio ambiente, también es conocida como retracción por auto desecación o retracción química.

Akçay y Tasdemir [13] han observado que para mitigar la deformación autógena es positivo el uso de piedra pómez pre-humedecida, especialmente si se reemplaza una fracción del árido normal de la parte de los finos mejor que de los gruesos.

Tabla 18- Proporciones de las mezclas de LWC [98]

Materiales	Hormigón	1	2	3	4
		PG-1%	TEG-1%	DPTE-1%	Control
Cemento	kg/m <sup>3</sup>	400	400	400	400

Materiales	Hormigón	1	2	3	4
		PG-1%	TEG-1%	DPTE-1%	Control
Arena	kg/m <sup>3</sup>	1000	1000	1000	1000
Agua	kg/m <sup>3</sup>	200	200	200	200
Aditivo	Tipo	PG	TEG	DPTE	–
	kg/m <sup>3</sup>	4	4	4	

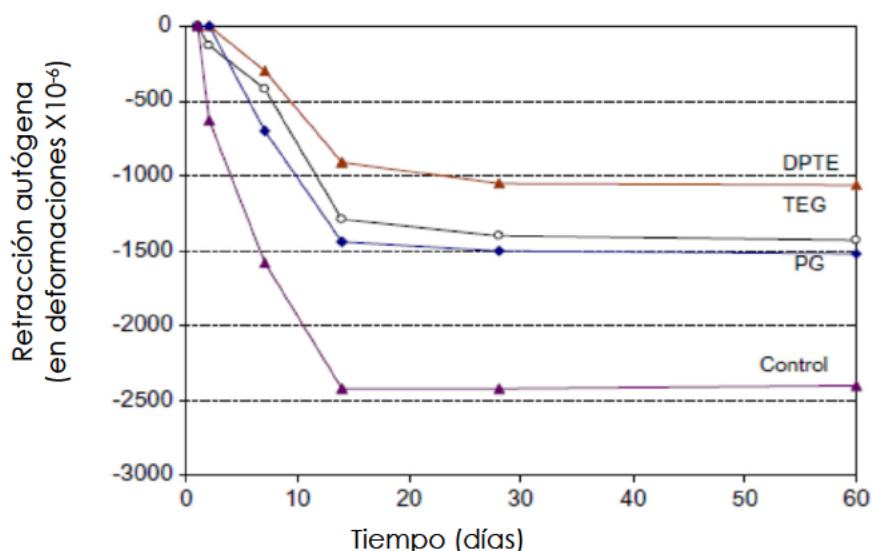


Figura 33- Retracción por secado de LWC con aditivos [98]

Dado que algunos LWA como la pumita son más porosos y absorben más agua, utilizan este árido para reducir la retracción autógena. En hormigones de alta resistencia, al contener más cemento, suelen tener más problemas de retracción autógena. Proponen un porcentaje de pumita con absorción y granulometría determinados que elimina este tipo de retracción, pero reduce la resistencia a compresión.

Otro caso parecido sobre la retracción autógena es el LWC con arcilla expandida que estudian [100]. Con este hormigón, si bien al contener pasta de cemento, en las primeras horas de fraguado sufre retracción autógena, también durante estas primeras semanas sufre una ligera expansión, esto es por la saturación del LWA que contiene agua que durante el secado pasa a la pasta de cemento provocando una ligera expansión. Este hecho, combinado con la retracción autógena debería desligar el árido de la pasta, pero no lo hace posiblemente por la baja rigidez del cemento en estas primeras horas o por el buen comportamiento del vínculo entre cemento y LWA. En la **Imagen 9** se observa como la grieta atraviesa el árido y la ITZ.

Un módulo elástico y resistencia más bajos de los áridos de arcilla expandida, y el buen vínculo con la pasta de cemento hacen que se produzcan unas grietas que se propagan a través los áridos en vez de hacerlo a través de la zona interfacial como lo hace el hormigón normal. Este hecho puede producir que el LWC sea más frágil que el hormigón normal.

- Retracción térmica; que resulta de una disminución en la temperatura del hormigón independientemente del tiempo de colocado.

- Retracción por carbonatación; producida por la reacción del cemento hidratado con el dióxido de carbono en el aire en presencia de humedad.

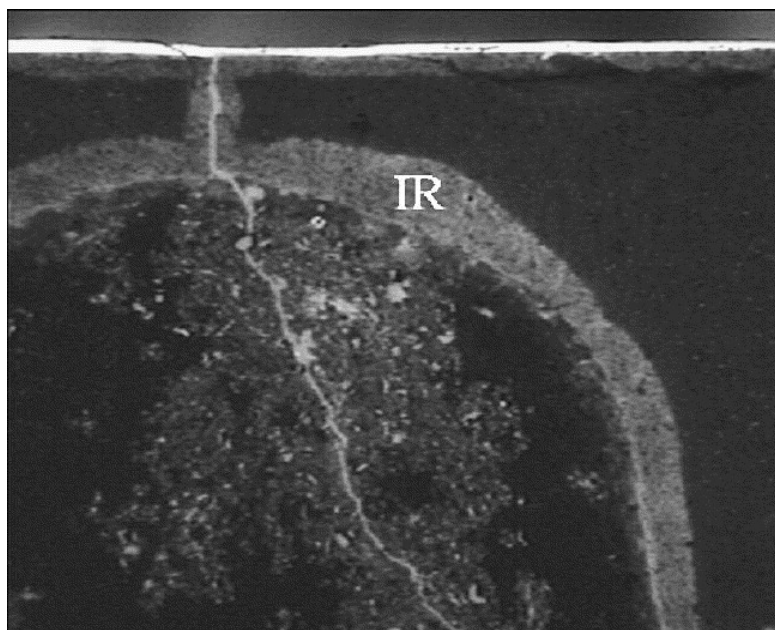


Imagen 9- Micrografía de microgrietas por retracción por secado propagada a través de una partícula de arcilla expandida [100]

### 2D4. DURABILIDAD

La durabilidad ha sido un tema al que se le confería poca importancia en la literatura clásica, sin embargo, en los últimos años, tiene una relevancia equivalente a las propiedades mecánicas del hormigón, tanto a nivel de normativa como de investigación.

La durabilidad del LWC se puede ver reducida, como el NC, por ataques químicos o físicos, los químicos más comunes son la reacción árido-álcali, carbonatación, sulfatos y ion cloruro, los ataques físicos son debidos a la temperatura, o la muy alta (fuego) o la muy baja (ciclos hielo-deshielo). Todos ellos necesitan de un mecanismo de transporte para profundizar en el hormigón, este mecanismo es la porosidad interconectada. Si los poros están conectados, permitirán a las sustancias dañinas acceder al núcleo de la pieza, de ahí que para analizar la durabilidad no se utilizar el dato del aire contenido (muy alto en los LWC), sino otros conceptos como la permeabilidad o la absorción de agua. Los LWC y los NC muestran niveles similares de permeabilidad y absorción de agua, esto es debido a la ITZ que, si no es impermeable, no permitirá que los poros se interconecten, [16, 24]. Los LWA más utilizados, como la pumita y los de CV, son materiales reactivos con propiedades puzolánicas, y esta reactividad influye en la zona interfacial haciendo que el hormigón sea menos permeable.

La combinación de árido ligero grueso con árido fino tradicional resulta más resistente frente a la carbonatación y al ión-cloruro que el LWC sólo con LWA o que el NC. Esta reacción también parece deberse al comportamiento de la ITZ que mejora con la combinación de los áridos. [18, 94, 143]. La cantidad de aire contenido de los



áridos hace del LWC un material más resistente al fuego que el NC, además, este alto porcentaje de aire, combinado con una mayor flexibilidad de los áridos, lo hace también más resistentes a los ciclos hielo-deshielo, [10, 14, 28, 56, 131, 144, 145].

La durabilidad, según la EHE-08 [104], de una estructura de hormigón, es su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural. Esta misma norma recomienda para garantizar la durabilidad, evitar la creación de poros y una red capilar interna poco comunicada. El informe ACI 201.2R-01 es una guía para la durabilidad del hormigón y define durabilidad del cemento hidráulico como, su capacidad para resistir la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un hormigón durable conservará su forma, calidad y servicialidad originales al estar expuesto a su ambiente.

Sobre los LWC, la EHE-08, indica que hay que tener en cuenta la erosión en los casos en los que el árido sea más blando del normal. Para el resto de las situaciones su comportamiento es similar al de los hormigones convencionales.

El Eurocódigo 2. 1.4. respecto a la durabilidad de los LWC, prescribe un recubrimiento de las armaduras de mayor espesor que en hormigones convencionales en ambientes con álcalis. También recomienda especial cuidado en las condiciones de curado ya que estos hormigones son más sensibles a una puesta en obra deficiente. [146]

Hernández Montes y Gil Martín, [147], para garantizar la durabilidad de una estructura de hormigón, condiciones relativas a:

- Máxima relación a/cm y mínimo contenido de cemento, para garantizar la mínima porosidad.
- Resistencias mínimas para garantizar la máxima compacidad.
- Formas estructurales adecuadas que proporcionen el máximo aislamiento del agua.
- Adopción del adecuado espesor de recubrimiento.
- Control de sustancias perjudiciales.
- Cantidad mínima de aire ocluido para resistencia a heladas.
- Limitación de fisura
- Calidad adecuada del hormigón, tanto en dosificación como en ejecución.

En este trabajo se tratarán las principales causas de reducción de la durabilidad, así como las recomendaciones para evitarlas en los LWC. A la hora de consultar investigaciones sobre durabilidad de LWC la principal dificultad ha sido comparar resultados en trabajos recientes. Si bien los valores relacionados con la porosidad y aire contenido sí suelen aportar datos más estandarizados, cuando se trata de los ataques químicos y físicos resulta más complicado ya que no hay un

ensayo que cuente con el consenso global. La **Tabla 19** muestra los ensayos realizados en más de un trabajo de los consultados.

Se puede observar en la tabla que los ensayos relacionados con la porosidad suponen una tercera parte de los estudios de durabilidad. Las pruebas que se suelen realizar son las de permeabilidad, absorción de agua y sortividad que pasaremos a describir a continuación. Los estudios sobre carbonatación, ciclos hielo/deshielo y retracción por secado suponen cada uno un 15% de los estudios y sí tienen un ensayo asociado globalmente aceptado. El menor consenso se encuentra en el ion cloruro. Es un ataque que si bien preocupa a muchos de los investigadores (la mitad de los estudios de durabilidad lo tratan), no hay un ensayo que esté aceptado por toda la comunidad científica. En la tabla se presentan 5 ensayos distintos ya que sólo se han presentado los que se repiten en más de un artículo y ninguno tiene una representación mucho mayor que el resto.

Tabla 19- Ensayos de durabilidad realizados en más de un artículo citado

	HIELO	RETRACCIÓN	POROSIDAD			CARBONA	IÓN-CLORURO					SULFAT
	C. cong /desc	Retracción secado	Permea	Absorción de agua	Sortividad	Prof. Carbonat	Prof. cloruros	E. R Pen. cloruros	Conc. cloruros	Coef. migraci	Coef. difusión	Cont. sulfatos
Jo, Park, y Park, [26]	X											
Teo <i>et al.</i> , [50]			X									
Hossain, Ahmed, y Lachemi, [9]		X	X									
Sengul <i>et al.</i> , [88]				X	X							
Kan y Demirboga, [56]	X											
Lo, Tang, y Nadeem, [18]						X						
Liu, Chia, y Zhang, [19]			X	X				X		X		
Liu, Chia, y Zhang, [1]			X	X				X		X	X	
Kayali y Zhu, [27]									X			
Kockal y Ozturan, [28]	X		X					X				
Maltais <i>et al.</i> , [92]							X		X	X		
Haque y Al-Khaiat, [93]			X			X	X					X
Haque, Al-Khaiat, y Kayali, [94]			X			X	X					X
Lo <i>et al.</i> , [20]					X			X				
Polat <i>et al.</i> , [95]	X			X	X							
Lo <i>et al.</i> , [21]						X						
Rossignolo y Agnesini, [22]				X								



# HORMIGÓN LIGERO CON NANOSÍLICE Y ÁRIDOS DE PLÁSTICO Y CORCHO RECICLADOS

	HIELO	RETRACCIÓN	POROSIDAD			CARBONA	IÓN-CLORURO					SULFAT
	C. cong /desc	Retracciór secado	Permea	Absorción de agua	Sortividad	Prof. Carbonat	Prof. cloruros	E. R Pen. cloruros	Conc. cloruros	Coef. migraci	Coef. difusión	Cont. sulfatos
Chindaprasirt y Rattanasak, [98]		X		X								
Gesoglu, Özturan, y Güneyisi, [30]		X										
Ke <i>et al.</i> , [24]				X								
Lura y Bisschop, [100]		X										
Lo <i>et al.</i> , [21]						X						
Lo y Cui, [23]				X								
Baronio <i>et al.</i> , [148]											X	
Thomas y Bremner, [149]							X					
Alduaij <i>et al.</i> , [150]		X	X									
Lanzón y García-Ruiz, [151]				X	X							
Gao, Lo, y Tam, [145]	X											
Elsharief, Cohen, y Olek, [143]				X	X							X
Correia, de Brito, y Pereira, [152]				X	X							
Teo, Mannan, y Kurian, [153]			X		X		X					
Nº DE ART. 32	5/15%	5/15%	9/28%	11/34%	7/22%	5/15%	6/18%	4/12%	2/6%	3/9%	2/6%	3/9%
	5/15%	5/15%	27/84%			5/15%	17/53%					3/9%

## 2D4A. POROSIDAD

El porcentaje de poros respecto del volumen, o porosidad, es uno de los conceptos que la literatura científica tradicional, relaciona directamente con la durabilidad. Que un material sea más poroso hace que, con más facilidad, sustancias peligrosas puedan acceder al interior de la pieza, pero sólo supone un aumento de la probabilidad de que ocurra no la seguridad de que lo haga. Para que la porosidad afecte a la durabilidad, los poros tienen que estar interconectados y por eso, en los estudios recientes, los ensayos que se realizan buscan esta interconexión y no sólo la porosidad.

Es importante dejar claro ese concepto porque muchos de los LWA son muy porosos y sin embargo hay LWC con resistencia muy alta frente a ataques químicos y físicos. Esto es porque los poros de estos áridos están aislados y o bien la capa externa del árido es muy impermeable, o bien lo es la zona interfacial, pero se consigue los poros no tengan una elevada longitud.

La **sortividad** es la medida de la capacidad de un medio para absorber líquidos por capilaridad. Una alta sortividad es muy negativa para la

En la investigación de Lo et al., [20], se ha valorado la posible relación entre el uso de agentes inclusores de aire y la sortividad del hormigón, ya que en principio parece lógico pensar que si la piedra contiene más aire, es más posible que los poros estén interconectados y por lo tanto aumente la capacidad de absorber agua por capilaridad, sin embargo los estudios que se han realizado con hormigones de densidad 1000 Kg/m<sup>3</sup> y con áridos de arcilla expandida, revelan que, el aumento en la cantidad de agentes inclusores de aire y por lo tanto la cantidad de aire contenido en el hormigón no supone un aumento en la sortividad. Ver **Tabla 20** y **Figura 34**.

Tabla 20 - Dosificaciones para ensayo de sortividad [20]

	Mezcla A	Mezcla B
Cemento	400 kg/m <sup>3</sup>	400 kg/m <sup>3</sup>
Árido grueso ligero	232 kg/m <sup>3</sup>	232 kg/m <sup>3</sup>
Árido fino ligero	378 kg/m <sup>3</sup>	378 kg/m <sup>3</sup>
Agua	160 kg/m <sup>3</sup>	160 kg/m <sup>3</sup>
Agente reductor de agua	2.6 L/m <sup>3</sup>	2.6 L/m <sup>3</sup>
Relación a/cm	0.40	0.40
Agente introductor de aire	0.3 L/m <sup>3</sup>	0.6 L/m <sup>3</sup>

La **porosidad accesible** del agua se mide por el ensayo de la saturación de agua. Se corta el primer cm de los testigos, se trituran y se mide la masa de agua y de aire de las muestras.

La **porosidad total o porosidad accesible** se mide por las proporciones de la mezcla calculando antes la porosidad de los áridos y del cemento. También se puede medir mediante un porosímetro de mercurio

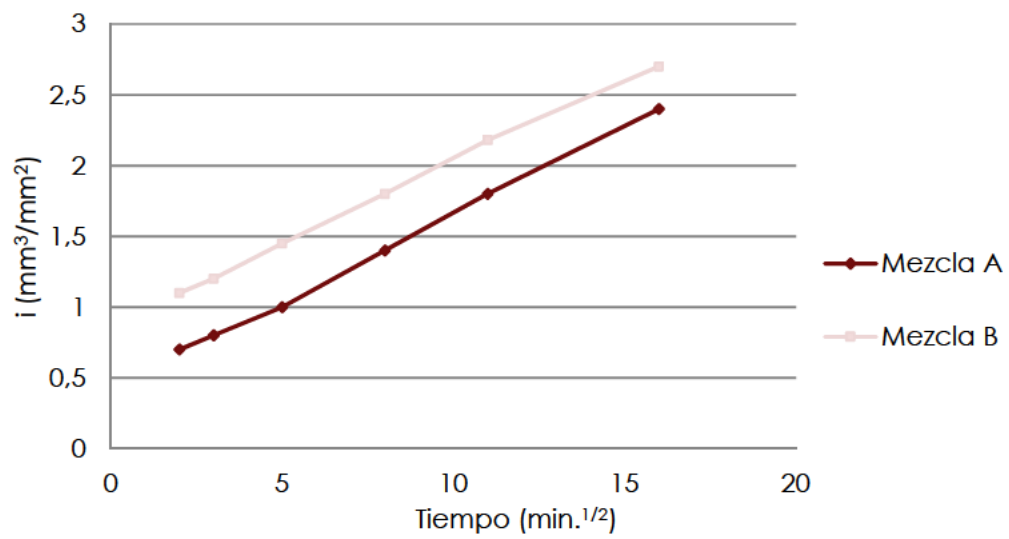


Figura 34- Sortividad de LWC a 28 días. [20]

En la investigación de Lo et al., [20], comentada antes para la sortividad, también se aporta información sobre la porosidad accesible. En la **Tabla 21** se muestran los resultados como referencia del rango habitual en LWC y NC.

## HORMIGÓN LIGERO CON NANOSÍLICE Y ÁRIDOS DE PLÁSTICO Y CORCHO RECICLADOS

Tabla 21 - Dosificación y características de hormigones convencionales y ligeros. [20]

Serie	Mezcla	a/ cem	Mat. cement, kg/m³		Agua de mezcla <sup>A</sup> , kg/m³	Agua abs. <sup>B</sup> , kg/m³	Árido de peso normal, kg/m³				LWA, kg/m³				SP <sup>C</sup> , l/m³	Porosid aces., % vol.	Res. comp MPa	Densi dad a 1 día kg/m³
			Cem	Humo Sílice			0–	1.18–	2.36–	4.75–	0–	1.18–	2.36–	4.75–				
							1.18 mm	2.36 mm	4.75 mm	9.5 mm	1.18 mm	2.36 mm	4.75 mm	9.5 mm				
I	NC1	0.38	500	–	188	–	517	172	76	850	–	–	–	–	2.5	10.6	71	2360
	LC1	0.38	500	–	190	51	517	172	76	–	–	–	–	395 <sup>b</sup>	2.7	11.0	50	1900
	LW1	0.38	500		188	66	517	172	76	–	–	–	–	255 <sup>a</sup>	1.8	13.0	30	1790
II	LC1	0.38	500	–	190	51	517	172	76	–	–	–	–	395 <sup>b</sup>	2.7	11.0	50	1900
	LC4- 25 <sup>E</sup>	0.38	500	–	190	147	–	–	–	–	321 <sup>d</sup>	83 <sup>a</sup>	40 <sup>b</sup>	395 <sup>b</sup>	2.1	21.5	38	1610
	LC4- 30 <sup>F</sup>	0.38	500	–	190	163	–	–	–	–					321 <sup>d</sup>	83 <sup>a</sup>	40 <sup>b</sup>	395 <sup>b</sup>
III	LW4	0.38	500	–	190	70	–	–	–	–	112 <sup>c</sup>	83 <sup>a</sup>	40 <sup>b</sup>	395 <sup>b</sup>	3.6	17.1	24	1390
	LW5	0.20	594	66	134	73	–	–	–	–	112 <sup>c</sup>	28 <sup>c</sup>	10 <sup>c</sup>	255 <sup>a</sup>	7.2 <sup>D</sup>	13.6	21	1310

a: Arcilla expandida F4.5., b: Arcilla expandida F6.5., c: Vidrio Expandido., d: Arcilla exp. machacada., A: Incluye agua de SP pero excluye agua absorbida por LWA., B: Agua absorbida por LWA., C: SP – Naftalen sulfonato., D: SP – policarboxilato., E: El agua supuesta absorbida durante el machaqueo es 25%, F: El agua supuesta absorbida durante el machaqueo es 30%.

## La profundidad de la penetración del agua (permeabilidad)

En la Tabla 22 se muestran permeabilidades de distintos artículos

Tabla 22- Permeabilidades con Porosímetro de mercurio

Artículo	Mezcla	Permeabilidad $10^{-11}$ m/s (28 días)	Resistencia Compresión Mpa	Densidad kg/m <sup>3</sup>
(Teo <i>et al.</i> , 2007)	CL	0,8	22,9	1960
	CC	6	28,1	1960
(Hossain, Ahmed, y Lachemi, 2011)	E-1-S	5,2	12	1612
	E-2-S	4,2	15	1694
	E-3-S	3,8	19	1727
	E-4-S	3,6	27	1734
	F-1	4,9	10	1432
	F-1	3,9	12	1500
	F-3	3,6	15	1529
	F-4	3,4	21	1535
(Liu, Chia, y Zhang, 2010)	NC1	0,9	71	2360
	LC1	1,1	50	1900
	LW1	1,2	30	1790
	LC4-25	1,2	38	1610
	LC4-30	4	34	1620
	LW4	0,4	24	1390
	LW5	0,1	21	1310
(Teo, Mannan, y Kurian, 2010)	CS1	7	28,1	1965
	CS2	21	28,1	1965
	CL	23	28,1	1965
	CC	78	28,1	1965

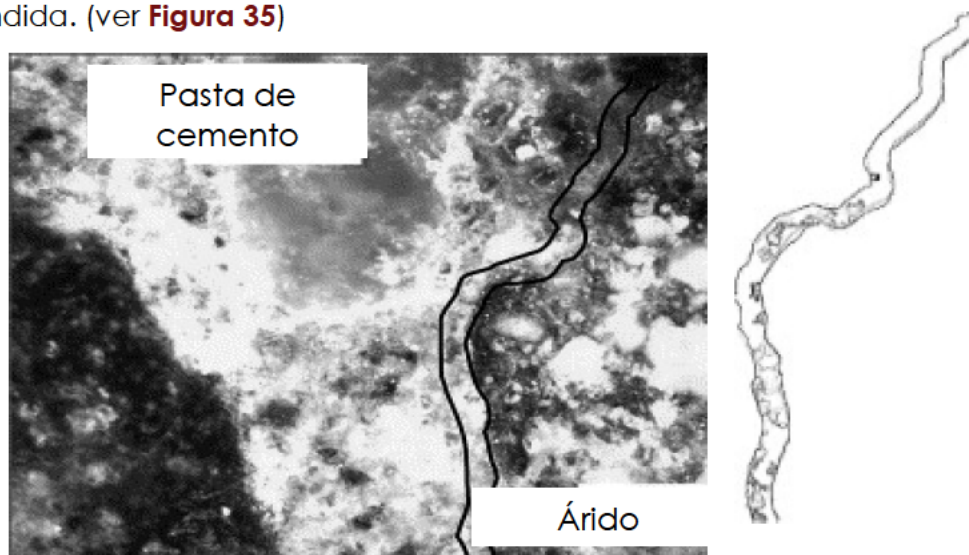
El hormigón con AACV tiene mejores niveles de absorción de agua que el hormigón normal, aunque es una excepción [28], ya que lo habitual es que los niveles de porosidad de los LWC sean mucho mayores que los del común ya que si pesa menos suele ser porque contiene más aire y éste se encuentra en los poros del árido. La porosidad está muy relacionada con la permeabilidad aunque el estudio de Hossain Ahmed, y Lachemi, [9], la relacionan más con la zona de transición interfacial dado que en experimentos con LWC, en el que todos los áridos son de pumita y ésta incluso se utiliza, molida muy fina, como conglomerante, dan mejores resultados de permeabilidad que hormigones comunes aun siendo la piedra pómez un material muy poroso.

Para calcular la porosidad se suele medir la absorción de agua, cuanto más baja mejor, áridos como OPS son porosos por naturaleza por lo que es uno de los parámetros para tener en cuenta. [50]

Esta zona interfacial y la porosidad de esta parecen el verdadero origen de la falta de resistencia de los LWC y dado que nos es sencillo conocer la resistencia de la pasta cementante o de los áridos por separado, esta porosidad de la zona interfacial es objeto de varios estudios. En investigaciones con arcilla expandida con distintos



grados de absorción se demuestra que si bien la relación agua-cemento no tiene mucho peso en el área de poros de la zona interfacial, sí que lo tiene la porosidad de los áridos ya que con arcillas expandidas con absorciones de 8,9%, 9,4% y 11%, el área de poros de la zona interfacial pasaba de 14,4% a 21.7%. También demuestran (Lo *et al.*, 2008), que cuantos más poros tiene la zona interfacial más débil es y que esto influye en la resistencia del hormigón. Sin embargo, queda por ver que esto ocurra con otros LWA y no sólo con la arcilla expandida. (ver **Figura 35**)



**Figura 35-** Imagen de la zona interfacial de 30µm entre cemento y árido (izquierda) y distribución de poros en la ITZ (derecha). [16]

Por otro lado, estudios como el de Sengul *et al.*, [88] aseguran lo contrario demostrando que los áridos con una alta porosidad pueden ser beneficiosos en hormigones con bajos niveles agua-cemento ya que el agua absorbida puede proveer de agua para la hidratación del cemento a largo plazo.

En la misma línea han profundizado Liu, Chia, y Zhang, [19]. En hormigones con LWA gruesos y finos convencionales, observan que, aunque éste sea muy poroso, si está bien embebido en la pasta cementicia, los poros no están interconectados y por lo tanto las sustancias dañinas no penetran en el hormigón, sin embargo, al usar también LWA como finos, la porosidad se incrementa notablemente y las sustancias perjudiciales sí que pueden ser capaces de entrar en el hormigón y reducir notablemente la durabilidad.

Parece demostrado que la cantidad de poros, en áridos para el LWC, es tan importante como la distribución de estos, el tamaño, conectividad entre ellos y tortuosidad. Una moderada cantidad de poros puede ser beneficiosa para un correcto curado de hormigones con baja relación agua cemento. Si la porosidad es demasiado alta, la zona interfacial también será más porosa y bajará la resistencia del hormigón. El combinar áridos finos convencionales con gruesos ligeros reduce la porosidad, aunque parece beneficiarse del correcto curado interno por lo que ofrece resultados positivos.

## 2D4B. ATAQUES QUÍMICOS

Los ataques químicos a los que se puede enfrentar el hormigón pueden tener un:

- origen intrínseco, por la reacción de sus propios componentes, o
- extrínseco, originado por un agente externo.
- En cuanto a la forma en que se presenta el ataque, este se puede dar:
  - En profundidad; por los poros del hormigón poco compacto, por microfisuras de retracción o por las oquedades producidas por una mala dosificación. A su vez se puede presentar de dos maneras:
    - Disolución de compuestos solubles en el agua que se propaga en el interior del hormigón, como es el caso de las aguas ácidas, que pueden provocar el debilitamiento de la estructura de la pasta de cemento.
    - Expansión que se debe a los compuestos débilmente solubles, que se forman en el interior del hormigón y que dan origen al crecimiento de cristales, que originan una presión capaz de llevar a la ruptura de la estructura. Este es el caso de los sulfatos, que dan forma a cristales expansivos como la etringita y la thaumasita.
  - Superficial; que actúa como una forma de erosión en los hormigones bien compactados. Su acción destructiva es menor y es posible tomar medidas que detengan la degradación del material.

La comisión RILEM agrupa en la **Tabla 23**, las sustancias agresivas para el hormigón.

Tabla 23- Sustancias agresivas para el hormigón

Agua dulce		
Ácidos	Minerales	Ácido brómico
		Ácido carbónico
		Ácido clorhídrico
		Ácido crónico
		Ácido fluorhídrico
		Ácido sulfurado
		Ácido nítrico
		Ácido fosfórico
		Ácido sulfúrico
		Ácido sulfuroso
	Orgánicos	Ácido acético
		Ácido fórmico
		Ácido húmico
		Ácido láctico fenol
		Ácido tánico
		Ácido butírico
		Ácido úrico
		Microorganismos
Bases		NaOH
		KOH



Sales	Urea
	-Aminas
	Cloruros
	Sulfatos
	Nitratos y nitritos
	Sulfuros
	Acetatos
	Esteres, estearatos, jabones
Alcoholes	
Soluciones de azúcar	
Aceites vegetales y animales	
Orgánicos (bacterias, algas, microorganismos, etc.	

2D4B1

## CARBONATACIÓN

La Carbonatación es una reacción fisicoquímica que tiene lugar entre el CO<sub>2</sub> y la alcalinidad del hormigón debido al hidróxido de calcio (CH) y al silicato cálcico hidratado (CSH). Normalmente la humedad relativa, la concentración de CO<sub>2</sub>, la temperatura, la permeabilidad y la alcalinidad del hormigón son factores influyentes en la carbonatación del hormigón [18]. Generalmente el LWC contiene áridos porosos a diferencia del hormigón normal, y la zona interfacial entre el árido y el cemento es más densa y fina. Por esta razón la carbonatación del LWC puede ser diferente de la del normal.

La velocidad de penetración de la carbonatación es materia de varias fórmulas. Una de ellas se expresa en la siguiente relación:

$$t = k x^2$$

donde t es el tiempo que requiere la carbonatación del hormigón en una profundidad x, siendo k una constante de acuerdo con las características del hormigón.

Uno de los métodos más sencillos para detectar la carbonatación del hormigón es el ensayo de la fenolftaleína. Se limpia la superficie donde se quiere medir y se pulveriza una solución al 1 o 2 por ciento de fenolftaleína en alcohol sobre el hormigón. Las áreas carbonatadas no cambiarán de color, mientras que las áreas con un pH mayor de 9 a 9.5 adquirirán un color rosa brillante. Este cambio muy apreciable de color muestra cuán profundamente ha progresado el frente de carbonatación. (ver **Imagen 10**).

En el estudio sobre carbonatación de LWC con áridos de arcilla expandida, Lo, Tang, y Nadeem, [18], experimentan que la profundidad de carbonatación con hormigones normales es mayor que en ligeros de la misma resistencia, este hecho se atribuye a la estructura de densidad de los poros en el LWC por tener una relación más baja a/cm, además como en los NC, la carbonatación se incrementa con el aumento de la proporción de agua en relación con el conglomerante y se reduce ante condiciones constantes de concentración de CO<sub>2</sub> y humedad.

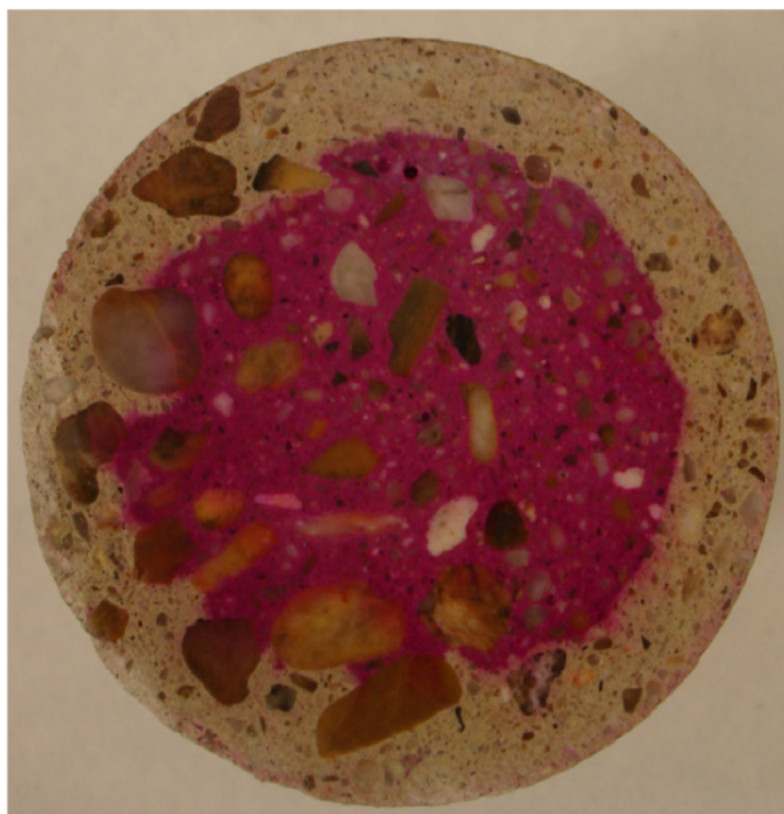


Imagen 10- Elemento con ataque por carbonatación tras ensayo de fenolftalína [154]

En la **Tabla 24** se detallan las dosificaciones de los distintos hormigones, de peso convencional y ligero, que se han utilizado en el estudio y en la **Figura 36** se muestran los resultados de los ensayos.

Tabla 24 - Detalle de dosificación (por m<sup>3</sup>) [18]

Mezcla	PFA <sup>b</sup> (%)	SF <sup>c</sup> (%)	a/c	Cem. (kg)	PFA (kg)	SF (kg)	Agua (kg)	Arena (kg)	AG <sup>a</sup> (kg)	SP <sup>d</sup> (kg)
Grupo 1: a/c = 0.30–0.43, cantidad de conglomerante: 460–550 kg/m <sup>3</sup>										
N1	0	0	0.43	460	0	0	198	722	981	2.76
N2	25	10	0.43	299	115	46	198	694	981	2.76
L1	0	0	0.30	550	0	0	165	726	437	3.85
L2	25	0	0.30	413	138	0	165	712	437	6.41
L3	25	5	0.30	385	138	28	165	688	437	5.13
L4	25	10	0.30	358	138	55	165	692	437	6.41
Grupo 2: a/c = 0.42–0.53, cantidad de conglomerante: 370–450 kg/m <sup>3</sup>										
N1	0	0	0.53	370	0	0	196	792	1007	1.85
N2	25	10	0.53	241	93	37	196	770	1007	1.85
L1	0	0	0.42	450	0	0	189	740	448	–
L2	25	0	0.42	338	113	0	189	729	448	–
L3	25	5	0.42	315	113	23	189	709	448	1.92
L4	25	10	0.42	293	113	45	189	712	448	3.85
Grupo 3: a/c = 0.55–0.70, cantidad de conglomerante: 300–350 kg/m <sup>3</sup>										
N1	0	0	0.70	300	0	0	210	792	1034	–
N2	25	10	0.70	195	75	30	210	773	1034	–

Mezcla	PFA <sup>b</sup> (%)	SF <sup>c</sup> (%)	a/c	Cem. (kg)	PFA (kg)	SF (kg)	Agua (kg)	Arena (kg)	AG <sup>a</sup> (kg)	SP <sup>d</sup> (kg)
L1	0	0	0.55	350	0	0	192	793	460	–
L2	25	0	0.55	263	88	0	192	785	460	–
L3	25	5	0.55	245	88	18	192	769	460	–
L4	25	10	0.55	228	88	35	192	772	460	–

a: Árido grueso [AG]: Arcilla expandida para Horm. ligero y granito triturado para normal,

b: Escoria Granulada de altos hornos, c: HS, d: SPs

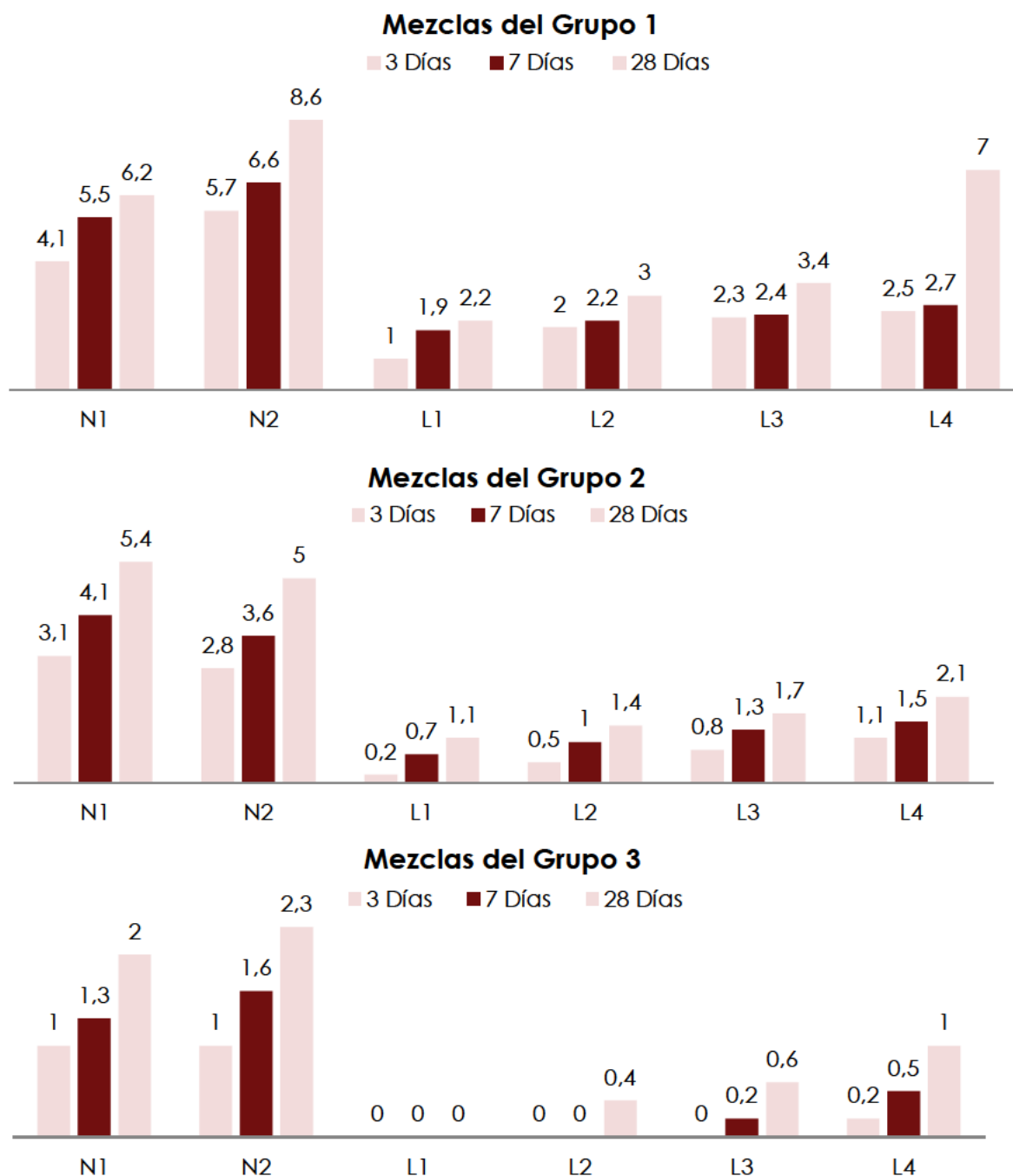


Figura 36- Profundidad de carbonatación, (mm) bajo curación con calor, frente a exposición de 3, 7 y 28 días. [18]

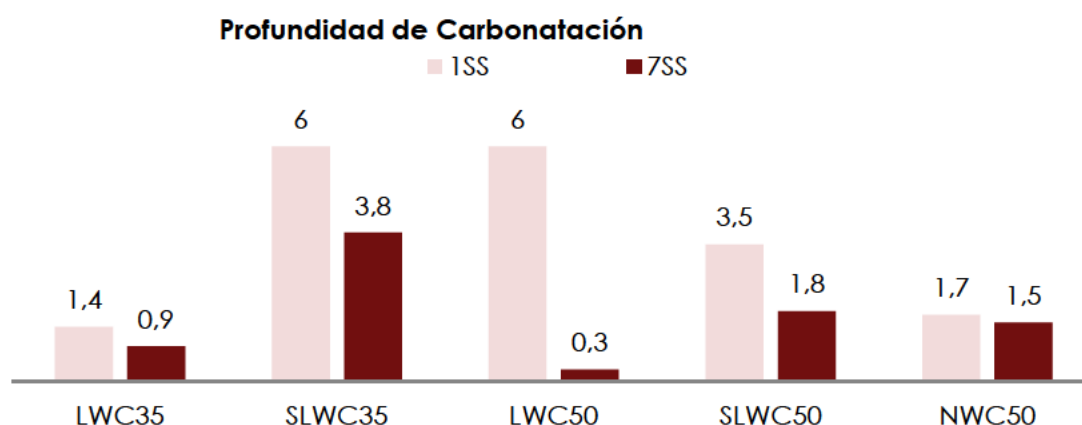
Por otro lado, Haque, Al-Khaiat y Kayali [94] concluyen que los LWC con arena y LWA tienen una mayor resistencia que los hormigones que sólo contienen LWA.

Para el experimento se toman hormigones de 35 y 50 MPa, tras una curación inicial idéntica convencional y las muestras se someten a una exposición de 1 (1SS) o 7 (7SS) días, en la costa kuwaití, cerca del mar, pero sin estar en contacto directo con él. El hormigón con arena y LWA tiene valores menores de penetración de agua y los autores sugieren este dato como la razón por la que obtienen mejores datos de durabilidad, así como que la penetración de agua puede ser un dato válido como indicador de durabilidad. (ver **Tabla 25** y **Figura 37**)

**Tabla 25**– Dosificación de los hormigones (kg/m<sup>3</sup>) [94]

Mezcla	Cem	Humo sílice	Agua	Arc. Exp Grueso	Arc. Exp. Fino	Arena	SP
LWC35	353	35,3	280	625	499	-	3,5
SLWC35	280	28	195	700	-	570	3
LWC50	536	53,6	294	567	357	-	6,5
SLWC50	480	48	200	726	-	345	5,5
NWC50	450	45	219	1084 <sup>a</sup>	-	571	5

a: Grava machacada de peso normal



**Figura 37**– Profundidad de carbonatación, (mm) bajo curación en ambiente marino cálido. [94]

La arena/LWA, con una correcta curación, presenta menos carbonatación que el NC, sin embargo, sólo con LWA, los resultados son de más penetración que el resto de las muestras. En el artículo no se aportan explicaciones para este hecho, aunque sí se hace mención a que esta característica ya fue descrita por Liu, Chia, y Zhang, [19] , como ya se ha tratado al comentar la porosidad, también observan el resultado positivo de combinar LWA gruesos con áridos finos convencionales y observan menos interconexión en los poros, esta puede ser una explicación para los resultados frente al ataque de la carbonatación.



## 2D4B2

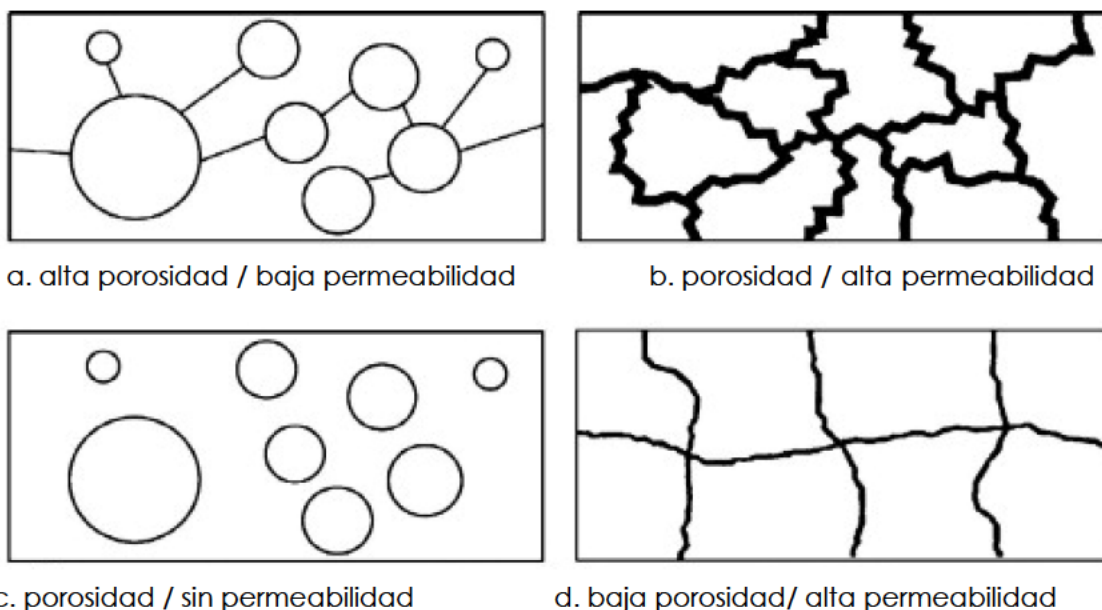
## IÓN CLORURO

Ataque del Ion cloruro. El agua de mar contiene sales disueltas de cloruro de sodio, sulfato magnésico, sulfato magnésico y bicarbonatos, estas sales se disocian y migran por capilaridad al hormigón. Este ataque es particularmente agresivo para con las armaduras del hormigón armado.

En la literatura especializada se puede comprobar que no hay un ensayo globalmente usado para determinar el ataque del ion cloruro. Esto es un problema a la hora de consultar distintas muestras de diferentes estudios, ya que no permite comparar resultados.

Esto sucede con los parámetros para medir la durabilidad en general, aunque es particularmente notable en este ataque químico. Si bien es relativamente frecuente que se comenten temas de durabilidad al estudiar los LWC, también lo es el que cuando se comenten estos términos se hable de la porosidad y ataques químicos, no lo es tanto es realizar el mismo tipo de ensayo con resultados comparables.

Como ya se trató cuando se definió la porosidad, también en el ataque por ion-cloruro el problema no es la porosidad sino la permeabilidad. La **Figura 38** presenta un diagrama explicativo de la diferencia entre porosidad y permeabilidad

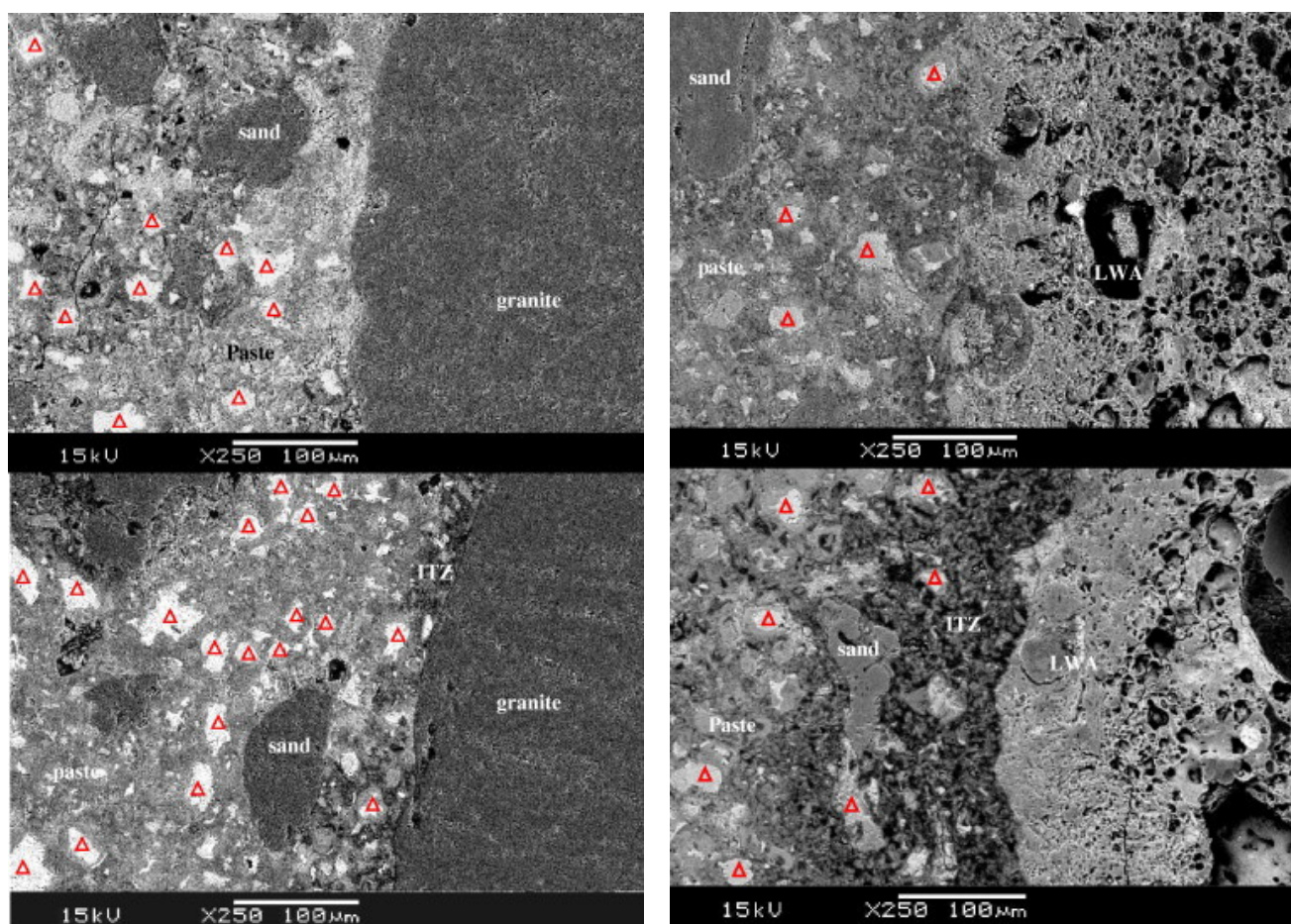


**Figura 38-** Diagrama esquemático mostrando diferencia entre porosidad y permeabilidad [155].

El estudio de Liu, Chia, y Zhang, [1] va un paso más allá y ha demostrado que LWC con finos ligeros son el doble de permeables que hormigones comunes y sin embargo un 25% más resistentes a la penetración del ion cloruro. Esto puede ser debido a que se reduce la zona interfacial, la percolación y al efecto de la mejora en curación interna. Este estudio ha comparado hormigones comunes con ligeros y ante la misma relación a/cm la penetración del cloruro es menor y descende cuanto más cantidad de LWA contiene la mezcla. (Ver **Imagen 11**)

Estas afirmaciones se basan en experimentos con arcilla expandida, aunque no está demostrado que ocurra lo mismo con otro tipo de áridos, sin embargo, es importante insistir en el dato que los LWC con arcillas expandidas tienen mejores resultados ante el ataque del ion cloruro que los hormigones de peso normal.

Con LWC con AACV peletizadas también se obtienen resultados similares, se demuestra que la penetración del cloruro es menor en este tipo de hormigones que en los de peso normal. Se explica por la mayor capacidad de absorción de los áridos lo que permite una reserva de agua para la curación interna, además el alto contenido en cenizas volante también fomenta esta respuesta ante el ion cloruro ya que los hormigones con alto contenido en CV y HS también son menos susceptibles a la penetración del cloruro, así los hormigones con este tipo de áridos presentan muy buenos resultados ante este ataque [27]



**Imagen 11-** Imágenes de la zona interfacial alrededor del árido grueso convencional (izquierda) y ligero (derecha) (Nota: - Partículas de cemento no hidratadas) [1]

En términos generales todos los estudios coinciden en que los LWC presentan valores similares a los de hormigones de peso normal en lo que a resistencia a la penetración del ion cloruro se refiere, aunque se puede puntualizar que los que contienen AACV conformados en frío dan resultados mucho peores que el hormigón de peso normal y los hormigones con áridos de bentonita con CV sintetizadas tiene

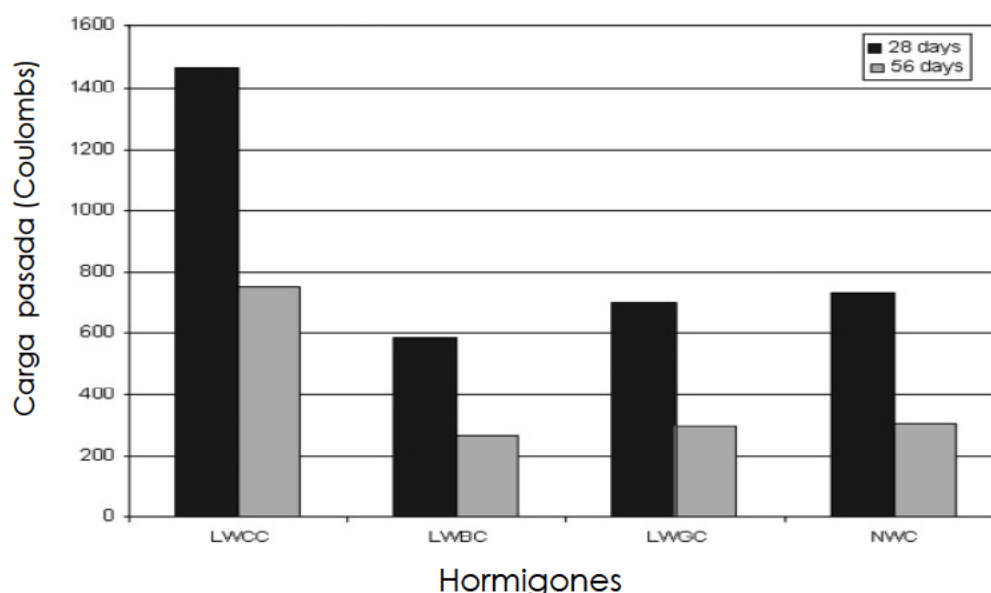


una resistencia ligeramente superior a los de hormigones comunes. [28]. (ver **Tabla 26** y **Figura 39**)

Este hecho puede ser explicado por la alta absorción y la porosidad abierta de los AACV conformados en frío, que permite el paso de la carga mejor que el resto de los hormigones estudiados.

**Tabla 26-** Dosificación de LWC con AACV y NC[28]

Hormigón	Cemento	HS	Agua	Árido fino		Árido Grueso	AEA <sup>a</sup> (%)	ST <sup>b</sup> (%)
				NS <sup>c</sup>	CS <sup>d</sup>			
LWCC	551	55	158	318	318	592	1.2(0.2)	6.7(1.1)
LWBC	548	55	157	316	317	567	1.2(0.2)	6.7(1.1)
LWGC	549	55	157	317	317	580	1.2(0.2)	6.7(1.1)
NWC	551	55	158	317	319	981	1.6(0.265)	7.3(1.2)



**Figura 39-** Valores de permeabilidad de cloruros a 28 y 56 días en testigos de hormigón [28]

El someter al hormigón a un curado previo de inmersión en agua mejora los niveles de resistencia a la penetración del cloruro alcanzando niveles significativos cuando este curado se produce durante una semana aunque el tenerlo tan solo un día ya supone una mejora en los resultados [94]. Esta técnica resulta especialmente recomendable cuando el hormigón estará expuesto a ambientes marinos ya que este tipo de ambientes son especialmente propicios a patologías por el ataque de cloruros. [93].

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

##### 3A. INTRODUCCIÓN

Durante la investigación se diseñarán hormigones con materiales de desecho como áridos que supondrán un descenso en la resistencia del material, por esta razón, el hormigón de referencia debe tener altas prestaciones a las que una reducción en las propiedades no suponga dejar de cumplir los requisitos para ser estructural.

La cantidad de cemento en los hormigones de altas prestaciones es alta ya que supone un recurso a la hora de elevar resistencia, por otro lado, su uso reduce la ecoeficiencia, por esta razón se busca ajustar la proporción de este material. Así, de hormigón de referencia con árido tradicional se harán dos dosificaciones en las que variará la cantidad de cemento, sobre estas dos mezclas se sustituirá parte del árido tradicional por los áridos ligeros reciclados.

De esta forma, los hormigones que se fabricarán serán:

- Hormigón de altas prestaciones no ligero, con 550 kg/m<sup>3</sup> de cemento. En adelante, HPC 550.
- Hormigón de altas prestaciones no ligero, con 700 kg/m<sup>3</sup> de cemento. En adelante, HPC 700.
- LWC, con 550 kg/m<sup>3</sup> de cemento. En adelante, ECO-HPC 550.
- LWC, con 700 kg/m<sup>3</sup> de cemento. En adelante, ECO-HPC 700.

Con estos objetivos se diseña un programa experimental en diferentes fases.

**Fase I.** Preselección de materiales y diseño de dosificación de referencia.

**Fase II.** Fabricación de hormigones para selección de materiales con pruebas de resistencia.

**Fase III.** Fabricación de morteros para la caracterización de los materiales, adiciones y aditivos, a las que se realizarán pruebas de resistencia y durabilidad

**Fase IV.** Fabricación de los hormigones con las mezclas seleccionadas.

**Fase V.** Campaña de ensayos de comportamiento endurecido y durabilidad.

### 3B. FASE I

Para planificar los ensayos y diseño de las primeras dosificaciones se selecciona, tras el estudio del estado del arte previo, los materiales de los previamente elegidos. También se agruparán para planificar los ensayos iniciales.

Para unas dosificaciones iniciales se comenzará diseñando una dosificación de referencia sobre las que se harán pequeñas modificaciones introduciendo los distintos materiales, con el fin de asegurar su conveniencia (puede que se deseche alguno si los resultados no son los esperados) y ajustar una horquilla, lo menor posible de dosificación del material.

Tras el estudio previo se parte de unas conclusiones que encaminan hacia la dosificación de referencia, estas son:

- Se busca un hormigón con alta resistencia lo que llevará a una alta cantidad de cemento, al menos de entre 400 y 750kg/m<sup>3</sup>. Se comenzará con 400kg/m<sup>3</sup>
- Sobre los materiales objeto de estudio se agruparán en tres grupos:
- Adiciones: Ns, CV y HS
- Áridos: Plásticos reciclados (3 tipos), corcho, poliuretano expandido y neumáticos triturados.
- Fibras: Esparto, acero, polivinilo y PP.
- Cemento, tipo I- 52,5R
- árido fino. Arena AF-T 0-4 (Árido fino triturado tamaño máximo de árido 4mm)
- árido grueso. Grava. AG-T-6/12-C. (Árido grueso triturado, de fracción granulométrica: mínimo 6mm y máximo 12mm, de naturaleza caliza)
- aditivo: SP marca Basf. modelo MasterGlenium Sky 511-R y lodos de papel calcinados (2 tipos)
- Agua de la red

Como datos de partida para planificar las dosificaciones se procede a caracterizar las materias primas, parte de este proceso se hará en la fase II con las pruebas de morteros, pero antes se somete a los materiales a diferentes ensayos que se nombran en la **Tabla 27**.

**Tabla 27-** Tabla de ensayos de caracterización de las materias primas

Ensayos
Granulometría de las partículas
Difracción de Rayos X
Composición química
Componentes de traza de la composición
Análisis Termogravimétrico

Dosificación del hormigón de referencia:

El diseño de la dosificación será un ensayo previo y datos cruciales como la relación agua cemento serán ajustados en el momento del ensayo ya que se utilizará el menor contenido de agua posible, en cualquier caso, sí se puede aproximar bastante a las cantidades con la información de que se dispone. Los métodos de dosificación habituales no son útiles en este caso ya que no se busca una resistencia en concreto, se trata de llegar a la máxima con los materiales de que se dispone. Tampoco interesa fijar la cantidad agua-cemento. Estos métodos sí que servirán para ajustar la proporción de arena y cemento según la granulometría (**Tabla 28**). Se hará según el método de La Peña (**Figura 40**):

**Tabla 28** - Granulometría de la arena

Tamiz (mm)	Pasa (%)	Acumulados (%)
8	100	0
5.6	89	11
4	78	22
2	57	43
1	47	53
0.5	34	66
0.25	18	82
0.125	15	85
0.08	11	89
0.063	10.9	89

Módulo granulométrico de la arena:

$$MF = \frac{11 + 22 + 43 + 53 + 66 + 82 + 85}{100} = 3,62$$

Se fija así que el porcentaje de arena será el 84% del total de árido, siendo el volumen de grava  $100 - 84 = 16\%$

Aunque ya se ha comentado que la relación agua-cemento se ajustará durante los primeros ensayos, para comenzar se partirá de una relación de 0,35.

Con todo lo dicho se llega a una dosificación inicial descrita en la **Tabla 29**

**Tabla 29** - Dosificación inicial

Componentes	Cemento	Agua	SP	HS	CV	Arena	Grava	Ns	TOTAL
Porcentaje %	12,59%	18,60%	0,56%	2,29%	4,03%	52,03%	9,91%	0,00%	100,00%

Sobre esta tabla se tendrán en cuenta varias determinaciones.

La densidad de cada uno de los componentes que habrá que calcular in-situ antes de cada ensayo, al igual que la humedad de los áridos que habrá que calcular y luego tener en cuenta a la hora de dosificar.

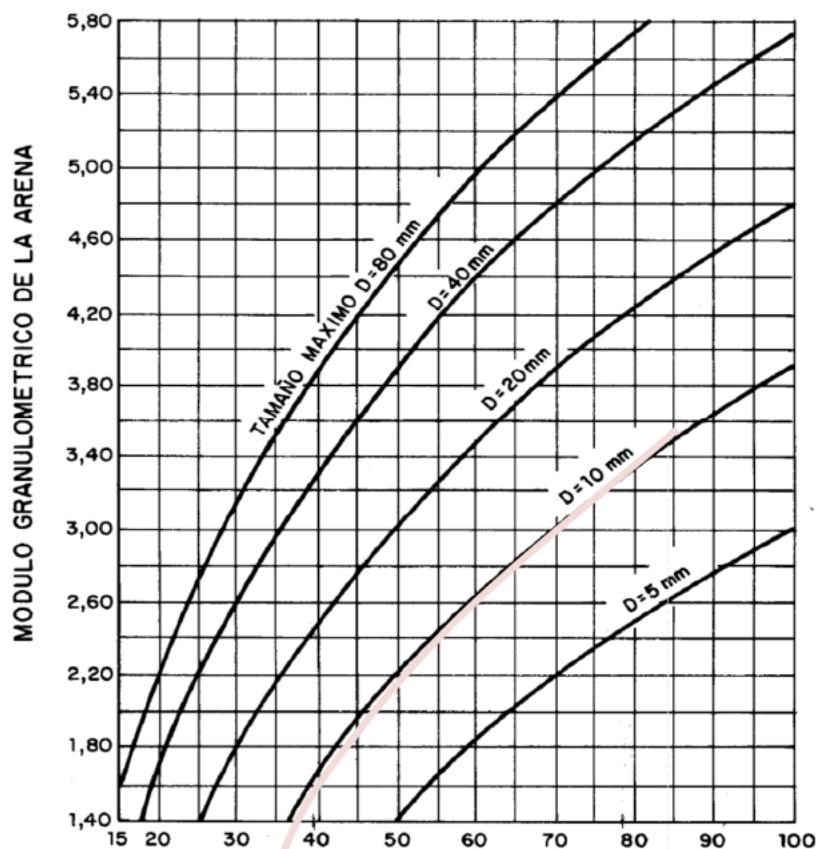


Figura 40 - Porcentaje de arena, en función de su módulo granulométrico y del tamaño máximo del árido [156]

### 3C. FASE II

Con los datos de partida descritos en el apartado anterior se comienza la campaña de fabricación de hormigón. Las mezclas se irán ajustando paso a paso con el fin de conseguir hormigón de altas prestaciones al que sustituyendo un determinado porcentaje de LWA se consiga un LWC, estructural. Los hormigones se dividen en cuatro grupos según sus componentes; hormigones de altas prestaciones (Tabla 30), de altas prestaciones con fibras (Tabla 31), ligeros (Tabla 32) y ligeros con fibras (Tabla 33).

Tabla 30 – Dosificación de hormigones de altas prestaciones en proporciones en peso

MEZCLA	DOSIFICACION En proporción del peso del cemento							
	Cem	Agua	CV	HS	Ns	Arena	Grava	SP
CCHA30-AM1	1,0	0,57				3,58	2,83	0,0060
REF1	1,0	0,39		0,28		1,72	1,15	0,0135
AM1-N2	1,0	0,39	0,22	0,12	0,0197	1,17	0,63	0,0100
CEM700 40%A	1,0	0,32		0,10		0,79	1,19	0,0200
CEM800 40%A	1,0	0,32		0,09		0,70	1,04	0,0200
CEM900 40%A	1,0	0,31		0,08		0,62	0,93	0,0200
CEM700 60%A	1,0	0,32		0,10		1,14	0,85	0,0200
CEM800 60%A	1,0	0,32		0,09		0,99	0,75	0,0200
CEM900 60%A	1,0	0,31		0,08		0,88	0,66	0,0200
CEM700 60%A AN	1,0	0,32		0,10		1,14	0,85	0,0200
CEM700 66%A	1,0	0,32		0,10		1,32	0,66	0,0200



MEZCLA	DOSIFICACION En proporción del peso del cemento							
	Cem	Agua	CV	HS	Ns	Arena	Grava	SP
CEM800 66%A	1,0	0,32		0,10		1,01	0,50	0,0200
CEM900 66%A	1,0	0,32		0,10		0,76	0,38	0,0200
CEM700 A/C0,24	1,0	0,24	0,10		0,0200	1,32	0,66	0,0200
CEM550 A/C0,24	1,0	0,25	0,13		0,0255	1,98	0,99	0,0200

**Tabla 31**– Dosificación de hormigones de altas prestaciones con fibras en proporciones en peso del cemento

MEZCLA	DOSIFICACION En proporción del peso del cemento											
	Cem	Agua	CV	HS	Ns	Arena	Grava	S.P.	Fib. MF400	Fib. Esp.	Fib. Acero	MF 22
AM3-FN	1,00	0,37	0,11	0,14	0,0276	1,35	0,60	0,0200	0,028			
AM4-F	1,00	0,41	0,22	0,13	0,0000	1,07	0,58	0,0120	0,062			
AM1-HUAR	1,00	0,33	0,11	0,11	0,0557	1,79	0,81	0,0300	0,054			
AM4-HUAR2	1,00	0,23	0,11	0,11	0,0557	1,93	0,88	0,0400	0,059			
AM1	1,00	0,34	0,11	0,11	0,0200	1,05	0,65	0,0200	0,026			
AM3	1,00	0,33	0,11	0,11	0,0200	1,43	0,09	0,0250	0,036			
A4 Fib PVA	1,00	0,34		0,10		1,88		0,0200	0,019			
A5 F. Espart	1,00	0,34		0,10		1,88		0,0200		0,015		
A6 F. Acero	1,00	0,34		0,10		1,88		0,0200			0,116	
A7 F. MSF 22	1,00	0,34		0,10		1,88		0,0200				0,0001
A8 Ref	1,00	0,34		0,10		1,88		0,0200				

**Tabla 32**– Dosificación de hormigones ligeros en proporciones en peso y volumen del cemento

MEZCLA	DOSIFICACION. En peso / En volumen											
	Cem	Agua	CV	HS	Arena	Grava	SP	Alfaten	Alfafil	Corch	Neum	EPS
AM2-P	1,00	0,40	0,22	0,12	0,87	0,63	0,0120		0,135			
	1,00	1,24	0,31	0,16	1,04	0,75	0,0354		0,348			
AM3-P	1,00	0,40	0,22	0,12	0,58	0,63	0,0120	0,269				
	1,00	1,24	0,31	0,16	0,70	0,75	0,0354	0,695				
alfafil 100%	1,00	0,31		0,10	1,32		0,0300		0,305			
	1,00	0,95		0,13	1,58		0,0886		0,788			
alfaten 100%	1,00	0,31		0,10	1,32		0,0300	0,305				
	1,00	0,95		0,13	1,58		0,0886	0,788				
neumat 100%	1,00	0,31		0,10	1,32		0,0300				0,305	
	1,00	0,95		0,13	1,58		0,0886				0,788	
corcho 100%	1,00	0,31		0,10	1,32		0,0300			0,051		
	1,00	0,95		0,13	1,58		0,0886			0,788		
eps 100%	1,00	0,31		0,10	1,32		0,0300					0,005
	1,00	0,95		0,13	1,58		0,0886					0,788
alfafil 73%	1,00	0,31		0,10	1,32	0,18	0,0300		0,223			
	1,00	0,95		0,13	1,58	0,21	0,0886		0,575			
alfaten 73%	1,00	0,31		0,10	1,32	0,18	0,0300	0,223				
	1,00	0,95		0,13	1,58	0,21	0,0886	0,575				
neumat 73%	1,00	0,31		0,10	1,32	0,18	0,0300		0,223			
	1,00	0,95		0,13	1,58	0,21	0,0886		0,575			



MEZCLA	DOSIFICACION. En peso / En volumen											
	Cem	Agua	CV	HS	Arena	Grava	SP	Alfaten	Alfafil	Corch	Neum	EPS
corcho 73%	1,00	0,31		0,10	1,32	0,18	0,0300			0,037		
	1,00	0,95		0,13	1,58	0,21	0,0886			0,575		
eps 73%	1,00	0,31		0,10	1,32	0,18	0,0300					0,004
	1,00	0,95		0,13	1,58	0,21	0,0886					0,576
corcho trit 73%	1,00	0,31		0,10	1,32	0,18	0,0300			0,037		
	1,00	0,95		0,13	1,58	0,21	0,0886			0,575		
alfafil 37%	1,00	0,31		0,10	1,32	0,42	0,0300		0,113			
	1,00	0,95		0,13	1,58	0,50	0,0886		0,292			
alfaten 37%	1,00	0,31		0,10	1,32	0,42	0,0300	0,113				
	1,00	0,95		0,13	1,58	0,50	0,0886	0,292				
neumat 37%	1,00	0,31		0,10	1,32	0,42	0,0300				0,113	
	1,00	0,95		0,13	1,58	0,50	0,0886				0,292	
corcho 37%	1,00	0,31		0,10	1,32	0,42	0,0300			0,019		
	1,00	0,95		0,13	1,58	0,50	0,0886			0,291		
eps 37%	1,00	0,31		0,10	1,32	0,42	0,0300					0,002
	1,00	0,95		0,13	1,58	0,50	0,0886					0,292
corcho trit 37%	1,00	0,31		0,10	1,32	0,42	0,0300			0,019		
	1,00	0,95		0,13	1,58	0,50	0,0886			0,291		
Ref Áridos	1,00	0,31		0,10	1,32	0,42	0,0300					
	1,00	0,95		0,13	1,58	0,50	0,0886					

Tabla 33– Dosificación de hormigones ligeros con fibras en proporciones en peso y volumen del cemento

MEZCLA	DOSIFICACION													
	Cem	Agua	CV	HS	Ns	Arena	Grava	SP	Fib. MF400	Fib. Esp.	Alfaten	Alfafil	Corch	Neum
AM5-CPF	1,00	0,40	0,217	0,122		0,48	0,63	0,0100	0,062		0,162		0,022	
	1,00	1,24	0,305	0,164		0,57	0,75	0,0295	0,147		0,418		0,349	
AM6-CPF	1,00	0,47	0,217	0,122		0,27	0,32	0,0120	0,079		0,179		0,050	
	1,00	1,45	0,305	0,164		0,32	0,39	0,0354	0,188		0,464		0,773	
AM1-CPFN	1,00	0,44	0,109	0,137	0,0276	0,35	0,56	0,0120	0,052		0,241		0,025	
	1,00	1,35	0,153	0,184	0,0755	0,42	0,67	0,0354	0,125		0,623		0,389	
AM2-CFN	1,00	0,37	0,109	0,137	0,0276	0,44	0,61	0,0120	0,028				0,071	
	1,00	1,16	0,153	0,184	0,0755	0,52	0,73	0,0354	0,068				1,100	
PVA	1,00	0,21	0,111		0,0634	1,52	1,14	0,0240	0,038			0,491		
	1,00	0,66	0,157		0,1734	1,81	1,36	0,0709	0,091			1,269		
FE-PLAST	1,00	0,23	0,111		0,0633	1,49	1,12	0,0250		0,029		0,483		
	1,00	0,72	0,157		0,1732	1,78	1,34	0,0738		0,089		1,248		
NEU-PVA	1,00	0,23	0,111		0,0633	1,49	1,12	0,0250	0,037			0,000		0,483
	1,00	0,72	0,157		0,1732	1,78	1,34	0,0738	0,089			0,000		1,247
AM2-HARL	1,00	0,33	0,111	0,111	0,0557	0,60	0,54	0,0240	0,054			0,351	0,054	
	1,00	1,03	0,156	0,150	0,1524	0,71	0,65	0,0708	0,130			0,907	0,842	
AM3-HARLE	1,00	0,33	0,119	0,112	0,0557	0,59	0,54	0,0300	0,027	0,021		0,348	0,054	
	1,00	1,02	0,167	0,151	0,1524	0,71	0,64	0,0886	0,064	0,064		0,900	0,835	

Se someterá a los hormigones a las pruebas de resistencia a compresión y cálculo de su densidad con lo que se obtienen suficientes datos para seleccionar los materiales definitivos y dosificaciones aproximadas que se ajustarán en la fase II.

### 3D. FASE III

En esta fase se fabricaron morteros con el fin de caracterizar los materiales susceptibles de ser componentes de los hormigones definitivos. Se prepararon morteros normalizados según la norma UNE-EN-196-1 como referencia sustituyendo, en las proporciones aproximadas que el estado del arte nos lleva a pensar como más ajustadas y probando su resistencia a compresión y flexión a 7 y 28 días.

En el caso de las adiciones se sustituirá cada componente por la cantidad de cemento en peso y en caso de los áridos las sustituciones se harán por la arena y en volumen.

El mortero de referencia está compuesto de; una parte de cemento, tres partes de arena normalizada CEN y media parte de agua, quedando así, cada amasada de tres probetas con: 450( $\pm$ 2) g de cemento, 1350( $\pm$ 5) g de arena y 225( $\pm$ 1) g de agua.

Se partirá de la información obtenida en el estado del arte y esta, en lo que adiciones y aditivos se refiere:

- Los estudios consultados recomiendan, para el Ns, un porcentaje de entre un 1,5% y un 2,5% del contenido total de aglomerante.
- De HS, está generalizada su dosificación entre un 10% y un 20% del peso total de aglomerante.
- De CV se recomienda, como máximo, alrededor de un 20% del peso del cemento.
- El uso de SP lo marca el fabricante, en este caso será uno de última generación, en base de policarboxilato de la marca Basf. modelo MasterGlenium Sky 511-R. Para él se recomienda entre un 0.6 y 3% sobre el peso del cemento.
- Para el caso de los lodos se probarán tanto calcinados como sin calcinar y de ambos entre el 1,5% y el 3%

Para los áridos que se utilizarán durante el proceso, la proporción de arena que se sustituirá en cada caso será entre un 10 y un 20% y también es importante comentar que dada la importancia que la granulometría de los áridos tiene en su resistencia, se modificará la granulometría de la arena en cada caso para obtener la misma que la de cada árido, esto llevará a tener para cada caso un mortero de referencia.

En la **Tabla 34** se presentan los morteros que se realizaron en esta fase para caracterizar aditivos, la **Tabla 35** muestra los morteros con fibras y la **Tabla 36** los que contienen los diferentes áridos.

Tabla 34- Dosificación morteros con aditivos y adiciones

Mezcla	DOSIFICACION En proporción del peso del cemento							Lodos Papel Sin Calcinar	Lodos Papel Calcinados
	Cem	Agua	Arena	CV	HS	Ns	SP		
A. LACRUZ	1,00	0,50	3,00						
REF	1,00	0,50	3,00						
CV 5%	1,00	0,53	3,12	0,06					
CV 10%	1,00	0,56	3,33	0,13					
CV 20%	1,00	0,64	3,76	0,29					
HS 10%	1,00	0,56	3,30		0,111				
HS 15%	1,00	0,59	3,48		0,176				
HS 20%	1,00	0,63	3,68		0,250				
Ns 1,5%	1,00	0,49	3,07			0,015			
Ns 2%	1,00	0,48	3,10			0,020			
Ns 2,5%	1,00	0,48	3,12			0,026			
SP 1%	1,00	0,49	2,99				0,010		
SP 2%	1,00	0,49	2,99				0,020		
SP 3%	1,00	0,48	2,98				0,030		
REF	1,00	0,50	3,00						
Calc 1,5%	1,00	0,51	3,72						0,014
Calc 2,5%	1,00	0,51	3,09						0,028
Sin Cal 1,5%	1,00	0,51	3,72					0,014	
Sin Cal 2,5%	1,00	0,50	3,00					0,028	

Tabla 35- Dosificación morteros con fibras

Mezcla	DOSIFICACION En proporción del peso del cemento				
	Cemento	Agua	Arena	Esparto	MF400
Varios ref	1,00	0,50	3,00		
MF400 2%	1,00	0,50	2,96		0,020
MF400 4%	1,00	0,50	2,92		0,040
Esparto 2%	1,00	0,50	2,95	0,009	

Tabla 36- Dosificación morteros con distintos áridos.

Mezcla	DOSIFICACION En proporción del peso del cemento						
	Cem	Agua	Arena	Alfaten	Alfafil	Corcho	Neumáticos
Alfaten ref	1,00	0,50	3,00				
Alfaten 10%	1,00	0,50	2,70	0,14			
Alfaten 20%	1,00	0,50	2,40	0,28			
Alfafil ref	1,00	0,50	3,00				
Alfafil 10%	1,00	0,50	2,70		0,138		
Alfafil 20%	1,00	0,50	2,40		0,277		
Neumat ref	1,00	0,50	3,00				
Neumat 10%	1,00	0,50	2,70				0,138
Neumat 20%	1,00	0,50	2,40				0,278
Varios ref	1,00	0,50	3,00				
Corcho 10%	1,00	0,50	2,10			0,069	
Corcho 20%	1,00	0,50	1,20			0,138	

Mezcla	DOSIFICACION En proporción del peso del cemento						
	Cem	Agua	Arena	Alfaten	Alfafil	Corcho	Neumáticos
Arena Tipo A	1,00	0,50	3,00				
Arena Tipo B	1,00	0,50	3,00				

Tras la fabricación de los anteriores morteros, y a la vista de los primeros resultados, se decide hacer otras amasadas, esta vez con el fin de conocer el comportamiento de los materiales seleccionados en lo que a durabilidad se refiere, una vez curados, éstos se someterán a pruebas de absorción capilar y PIM.

Esta vez las dosificaciones de cada material se ajustarán a las proporciones que se utilizarán para la fabricación de los hormigones definitivos. (Ver **Tabla 37**)

**Tabla 37** - Dosificación morteros para estudio de durabilidad

Mezcla	DOSIFICACIÓN (En proporción del peso del cemento)							
	Cemento	Agua	Arena normal	Arena 4mm	Arena 2mm	Árido plástico	corcho	Ns
Ref.	1,00	0,50	3,00					
Alfafil Ref	1,00	0,50	2,12	0,61	0,273			
Alfafil 29,5%	1,00	0,50	2,12			0,409		
Corcho 18,5%	1,00	0,50	2,45				0,043	
Ns 1,5%	1,00	0,49	3,08					0,015
Ns. 2%	1,00	0,48	3,10					0,020

### 3E. FASE IV

Con base en los anteriores apartados se llega a unas dosificaciones ajustadas a las necesidades planteadas y se procederá a fabricarlos. En la **Tabla 38** aparecen las dosificaciones definitivas.

**Tabla 38**- Dosificaciones de los hormigones definitivos.

MEZCLA	DOSIFICACION (% En peso / % En volumen)									
	Cemento	Agua	CV	Ns	Arena	Grava	SP	Alfafil	Corcho	Lodo
HPC550	23,03	6,70	5,44	0,59	42,52	21,26	0,46			
	17,65	15,92	5,88	1,23	38,85	19,43	1,04			
HPC700	29,58	7,61	2,96	0,59	39,18	19,59	0,50			
	22,67	18,07	3,19	1,24	35,80	17,90	1,12			
ECO-HPC700	36,68	9,43	3,67	0,73	31,10	6,80	0,62	9,93	1,04	
	22,67	18,07	3,19	1,24	22,91	5,01	1,12	15,85	9,92	
ECO-HPCC550	29,23	8,50	6,91	0,74	34,38	7,56	0,58	10,96	1,14	
	17,70	15,97	5,90	1,23	24,83	5,46	1,05	17,14	10,73	
HPC550+LODOS	22,97	6,68	5,43	0,58	42,39	21,19	0,46			0,30
	17,60	15,87	5,86	1,22	38,73	19,36	1,04			0,32
ECO-HPC550+LODOS	29,12	8,47	6,88	0,74	34,25	7,53	0,58	10,91	1,14	0,38
	17,65	15,91	5,88	1,23	24,75	5,44	1,04	17,09	10,69	0,32

**3F. FASE V**

En esta fase se procede a realizar los ensayos a los hormigones definitivos, las pruebas serán tanto para conocer sus propiedades mecánicas (**Tabla 39**), estabilidad dimensional (**Tabla 40**), como su comportamiento en lo que a durabilidad se refiere (**Tabla 41**).

Tabla 39 – Ensayos de resistencia mecánica a los hormigones definitivos

Ensayos Resistencia Mecánica	Norma	Edad curado
Compresión	UNE-EN:12390-3:2009	7, 28 y 90 días
Densidad	UNE- EN: 12390-7:2009	28 días
Tracción Indirecta	UNE-EN 12390-6 :2011	28 días
Módulo Elástico	UNE EN 12390-13:2014	28 y 90 días

Tabla 40 – Ensayos de estabilidad dimensional a los hormigones definitivos

Ensayos Estabilidad Dimensional	Edad probeta
Evolución de la temperatura de los hormigones durante el fraguado	Primeras 48 horas
Ensayo de pérdida de peso en probetas	Hasta 100 días
Retracción	Hasta 45 días

Tabla 41 – Ensayos de durabilidad a los hormigones definitivos

Ensayos Durabilidad	Norma	Edad probeta
Porosimetría por intrusión de mercurio (PIM)	ASTM D4404-84	60 días
Absorción de agua por capilaridad	UNE EN 83982:2008	56 días
Resistencia a la penetración de agua	UNE EN 12390-8:2009	56 días
Profundidad de carbonatación acelerada	UNE EN 83993-1:2013	56 y 90 días
Penetración de iones cloruro acelerada	AASHTO T259	56 días
Interfaz árido-pasta		56 días

## 4. MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS

### 4A. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen los materiales y los procedimientos de ensayo. La sección 4B se dedicará a caracterizar los componentes de los hormigones y a describir los procesos de fabricación de muestras y su curación. Los resultados ofrecen la información necesaria para caracterizar los materiales.

Al cemento y las adiciones se les realizaron granulometrías láser, difractograma de rayos X, fluorescencia de rayos X y termogravimetrías con el fin de caracterizar los materiales a nivel químico.

Las dosificaciones de los morteros realizados para estudiar la influencia de adiciones en las propiedades mecánicas se indican en la **Tabla 34**.

Los áridos fueron analizados bajo microscopio, se calcularon las granulometrías y se realizaron dos campañas de fabricación de morteros, la primera con el fin de conocer su comportamiento mecánico (para dosificaciones ver la **Tabla 36** y la segunda para caracterización a nivel de durabilidad (las dosificaciones se detallan en la **Tabla 37**).

En la sección 4C se dará una descripción de las pruebas y técnicas aplicadas a los hormigones.



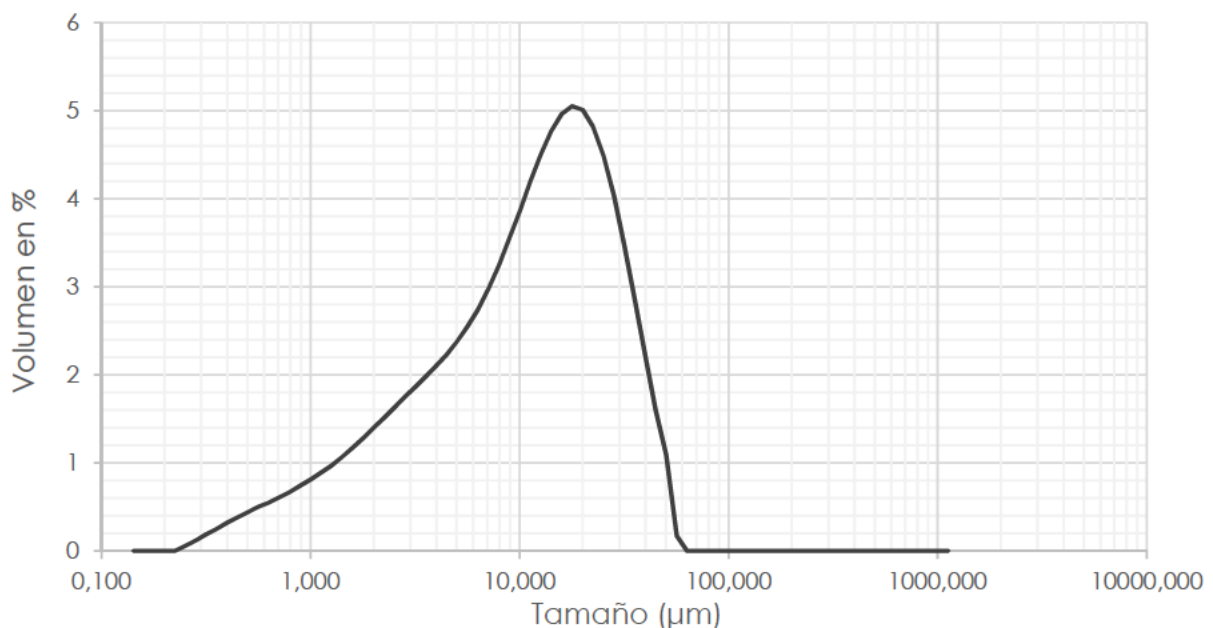
#### 4B. MATERIALES COMPONENTES DE MORTEROS Y HORMIGONES.

##### 4B1. CEMENTO

El cemento utilizado durante todo el estudio es el CEM I 52.5R.

Los resultados de la granulometría láser se presentan en la **Figura 41**. La granulometría láser se determina con el analizador Mastersizer 2000 de Malvern Instruments. La difracción de rayos X (DRX) permite identificar las principales fases mineralógicas.

El tamaño de partícula predominante es de  $11\mu\text{m}$ , el diámetro mínimo es de  $0.25\mu\text{m}$  y el mayor de  $65\mu\text{m}$ . Mas tarde se compararán los resultados con el resto de los componentes lo que permitirá su contextualización. Los resultados son los habituales para una muestra de cemento.



**Figura 41-** Distribución de tamaño de partícula del cemento

La **Tabla 42** y **Figura 44** muestran los resultados del ensayo DRX. Se observa que el cemento es, principalmente, silicato de calcio con un 10% de óxidos de calcio y un 10% de anhidrita.

La espectroscopía de fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica no destructiva que analiza la química elemental mostrando los elementos que componen la muestra y su cantidad.

Los resultados de la espectroscopía de fluorescencia de rayos X (FRX), se muestran en la **Tabla 43** y la **Figura 42** e indican que, el elemento mayoritario es el calcio seguido del silicio y pequeñas cantidades de magnesio, hierro, aluminio, azufre y potasio.

Tabla 42- Análisis estructural del cemento por difracción de rayos X de la parte cristalina

Concentraciones en % (p/p)	
Fases	Cemento
<b>Silicatos</b>	<b>79</b>
Silicato de calcio	79
<b>Óxidos</b>	<b>11</b>
Óxido de Ca, Mn, Fe y Al	9
Óxido de Ca y Al	2
<b>Otros</b>	<b>10</b>
Anhidrita	10
Yeso	<1
Cristalinidad (%)	78
Suma (%)	100

Tabla 43 – Resultados del ensayo de FRX

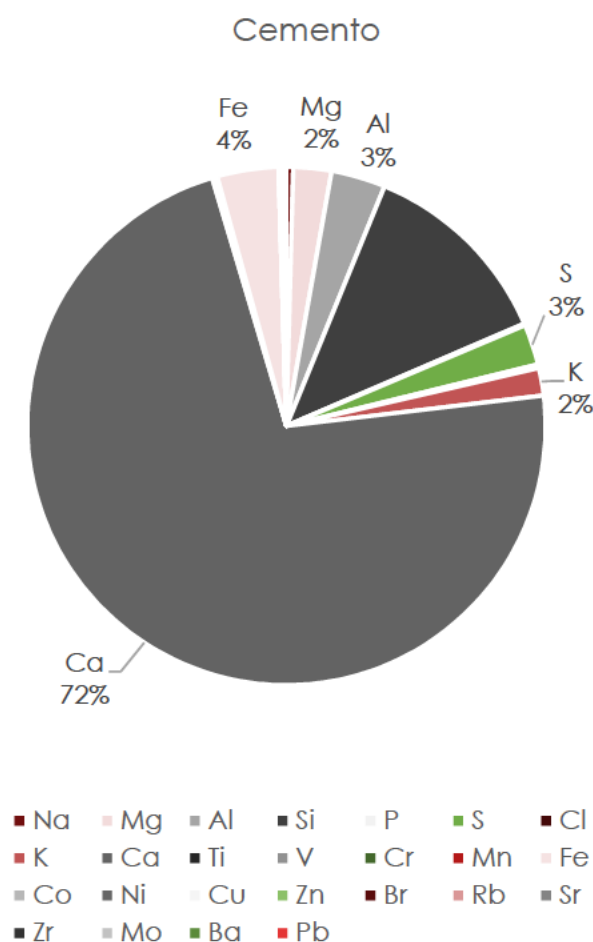


Figura 42 – Principales elementos del cemento

Concentraciones en %	
Elementos	Cemento
PF	1,4600
O	34,5134
Na	0,2760
Mg	1,5200
Al	2,1700
Si	7,8940
P	0,0769
S	1,6260
Cl	0,1360
K	1,1000
Ca	46,2684
Ti	0,1550
V	0,0120
Cr	0,0075
Mn	0,0280
Fe	2,4510
Co	0,0008
Ni	0,0070
Cu	0,0708
Zn	0,0614
Br	0,0017
Rb	0,0045
Sr	0,0879
Zr	0,0020
Mo	0,0077
Ba	0,0480
Pb	0,0140
Suma (%)	100,0000
Masa (g)	10,00

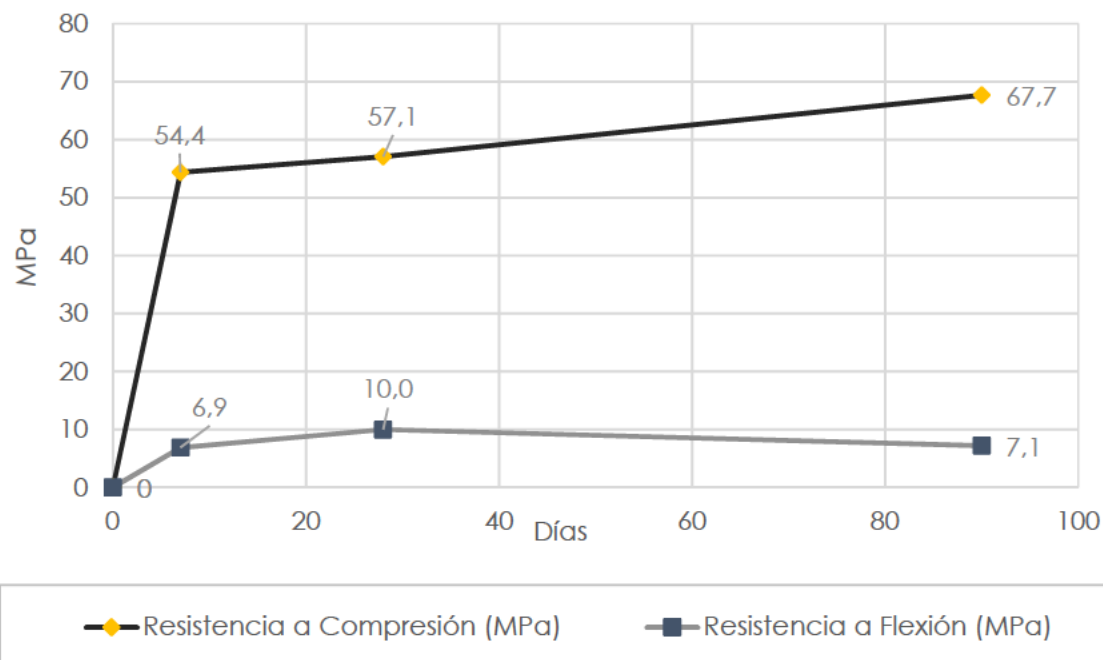
Los valores en rojo provienen del análisis térmico. PF es la pérdida al fuego en el rango 30–1100 °C.

O es el oxígeno estequiométrico de los elementos en el rango Na–Ba

El análisis termogravimétrico (ATG) mide la masa que pierde una muestra al aplicarle temperatura a lo largo del tiempo. Esto permite caracterizar los materiales en cuanto a su descomposición.

El análisis termogravimétrico del cemento (**Figura 45**) muestra que al calentar muestras de cemento se producen dos descomposiciones identificables en las curvas del TGA. La primera de ellas, alrededor de  $400^{\circ}\text{C}$ , corresponde a la descomposición del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  para dar agua y  $\text{CaO}$ . Calculando la pérdida de masa de agua se puede conocer la cantidad de portlandita que hay en la muestra. La segunda transformación ocurre alrededor de  $600^{\circ}\text{C}$  y corresponde a la descomposición del  $\text{CaCO}_3$  para dar  $\text{CO}_2$  y agua. En este caso determinando la masa de  $\text{CO}_2$  perdida se puede calcular la cantidad de carbonato cálcico que hay en la muestra. Además de estas dos fases, es posible determinar la cantidad de agua combinada en el gel C-S-H y en las fases minoritarias de aluminatos y sulfoaluminatos AFm y Aft a partir del agua que se pierde entre  $110^{\circ}\text{C}$  aproximadamente y el comienzo de la descomposición de la portlandita. Puesto que el agua perdida en ese rango de temperaturas es debida principalmente a la descomposición del C-S-H, a partir de aquí se la denominará agua de gel C-S-H. El agua perdida entre  $20$  y  $110^{\circ}\text{C}$ , que correspondería al agua libre, depende del ambiente en el que se encuentra la muestra.

Las propiedades mecánicas de los morteros normalizados según UNE-EN 196-1 se indican en la **Figura 43**. Los resultados, con una resistencia a compresión, a 28 días de  $57,1$  MPa, son los esperados, por encima de los  $52,5$ MPa.



**Figura 43-** Datos de resistencia a compresión según UNE-EN 196-1

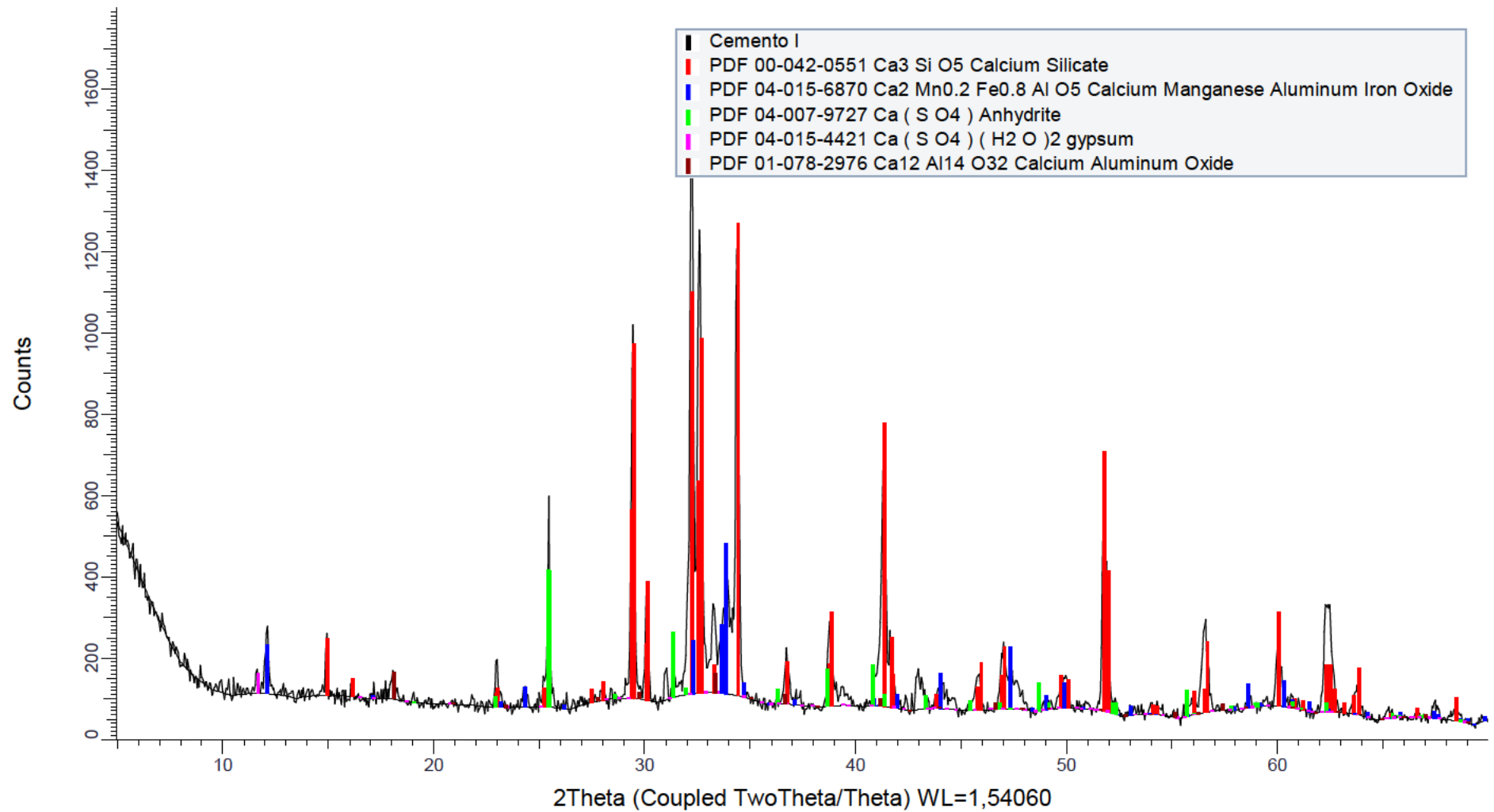
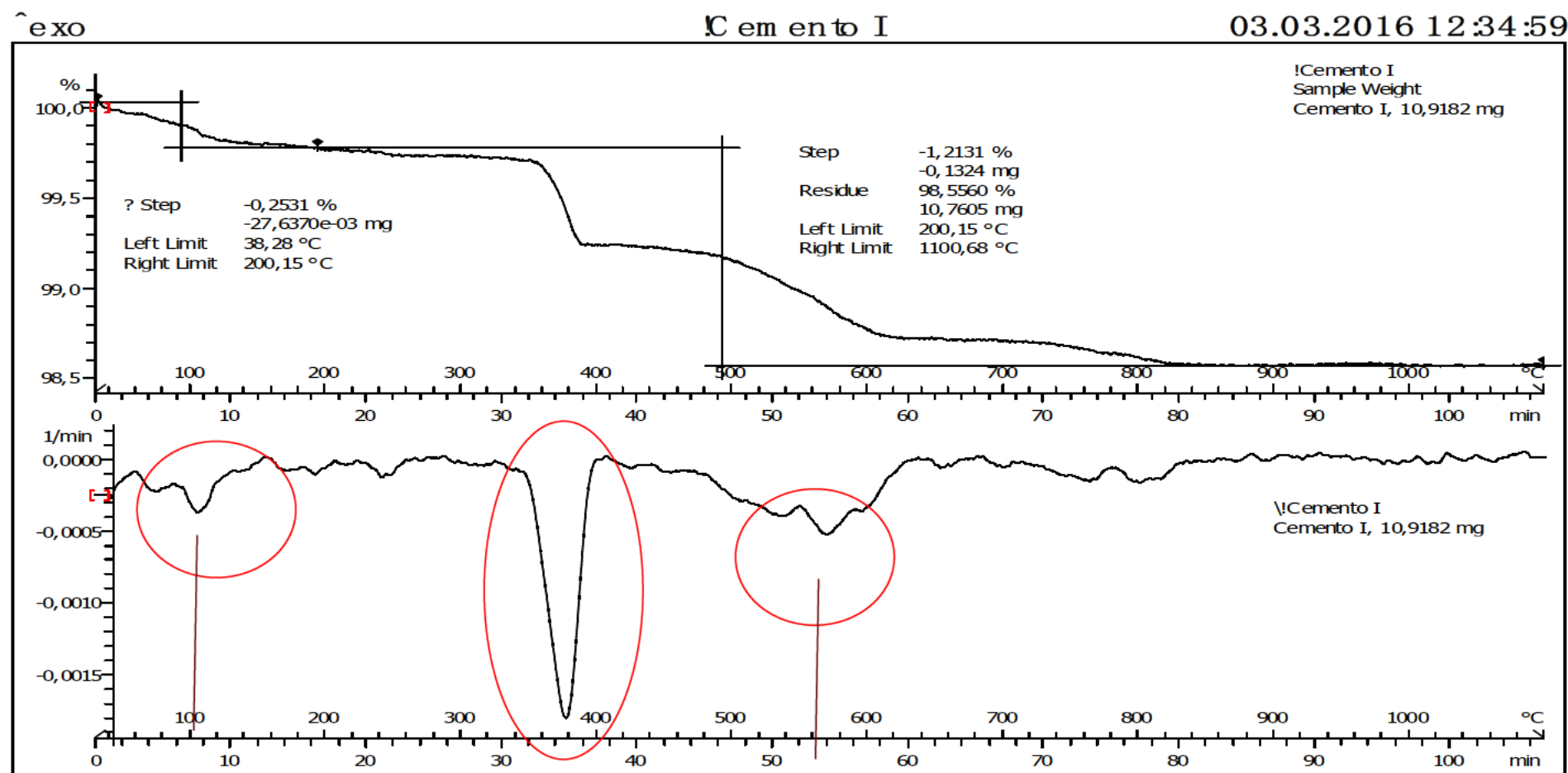


Figura 44 – Análisis DRX del cemento



Lab: SA II

STAR SW 10.00

Figura 45- ATG del cemento



#### 4B2. ADICIONES Y ADITIVOS

En este punto se analizan las adiciones que pueden reemplazar parcialmente al cemento mejorando su sostenibilidad sin afectar negativamente al comportamiento mecánico, ya de por sí mermado por el uso de los áridos ligeros. El uso de superplastificante busca reducir la relación  $a/cm$  manteniendo una trabajabilidad suficiente para un uso industrial "in Situ" del hormigón. (**Imagen 12**).

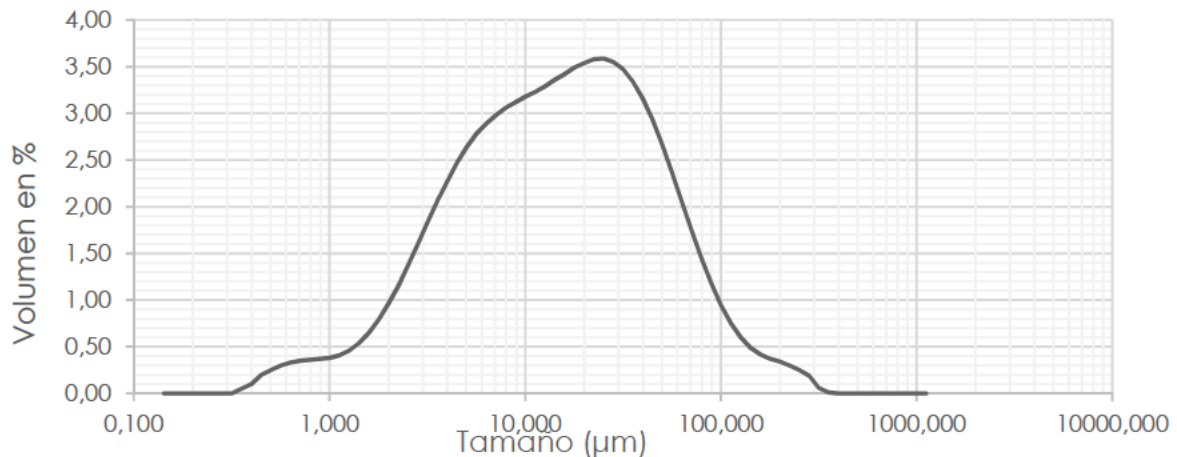


**Imagen 12**– Probetas de morteros dispuestos antes (imagen superior) y durante (inferior) las pruebas de rotura.



#### 4B2A. CENIZA VOLANTE (CV)

La distribución granulométrica de la CV se muestra en la **Figura 46**. El tamaño de partícula predominante es de  $15\mu\text{m}$ , el diámetro mínimo es de  $0.35\mu\text{m}$  y el mayor de  $350\mu\text{m}$ . Los  $15\mu\text{m}$  se acercan a los 11 del cemento, así como el mínimo, que en el cemento era de 0.25. El diámetro máximo, por el contrario, está muy por encima de los  $65\mu\text{m}$  del cemento.



**Figura 46-** Distribución de tamaño de partícula de la CV

El análisis de las CV (**Tabla 44** y **Figura 50**) por difracción de Rayos X muestra que es un material fundamentalmente constituido por cuarzo y mullita con un 9% de silicato de calcio. Si se tiene en cuenta la suma de los óxidos  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  en las CV, es de 79,35%, cumpliendo con los requisitos especificados en la norma UNE-EN 450-1:2013 y, además, se puede clasificar como de la clase F, conforme especifica la ASTM C618-12, donde la suma de los componentes  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$ . Por otro lado, como el contenido de CaO es muy reducido, encontrándose por debajo del 10%, las cenizas volantes pertenecen al grupo de silicoaluminosas (bajo contenido de cal), así lo indica Mehta [157]. Con respecto al contenido en  $\text{SO}_3$  y MgO estas no superan el 3% ni el 4%, como especifica UNE-EN 450-1:2013.

**Tabla 44 -** Análisis estructural de las CV por difracción de rayos X de la parte cristalina

Concentraciones en % (p/p)	
Fases	Cenizas volantes
<b>Silicatos</b>	<b>9</b>
Silicato de calcio	9
<b>Óxidos</b>	<b>87</b>
Cuarzo	32
Mullita	49
Corindón	6
<b>Carbonatos</b>	<b>4</b>
Dolomita	4
Cristalinidad (%)	35
Suma (%)	100

Las CV cumplen con las normas UNE EN 450-1 2013 y UNE EN 450-2 2006 para su empleo como adición al hormigón. La composición química queda reflejada en la **Tabla 45** y **Figura 47** mostrando que los elementos mayoritarios son el silicio, aluminio y hierro:

Tabla 45 – Resultados del ensayo de FRX de las CV

Concentraciones en %	
Elementos	Ceniza volante
PF	3,1000
O	44,6659
Na	0,9230
Mg	1,1900
Al	12,4200
Si	22,6200
P	0,3920
S	0,3840
K	1,8000
Ca	5,8444
Ti	0,7630
V	0,0200
Cr	0,0142
Mn	0,0596
Fe	5,2450
Co	0,0040
Ni	0,0135
Cu	0,0150
Zn	0,0208
Ga	0,0042
Rb	0,0078
Sr	0,1932
Y	0,0008
Zr	0,0399
Nb	0,0029
Mo	0,0016
Ba	0,2490
Pb	0,0062
Suma (%)	100,0000
Masa (g)	10,00

Los valores en rojo provienen del análisis térmico. PF es la pérdida al fuego en el rango 30–1100 °C.

O es el oxígeno estequiométrico de los elementos en el rango Na–Ba

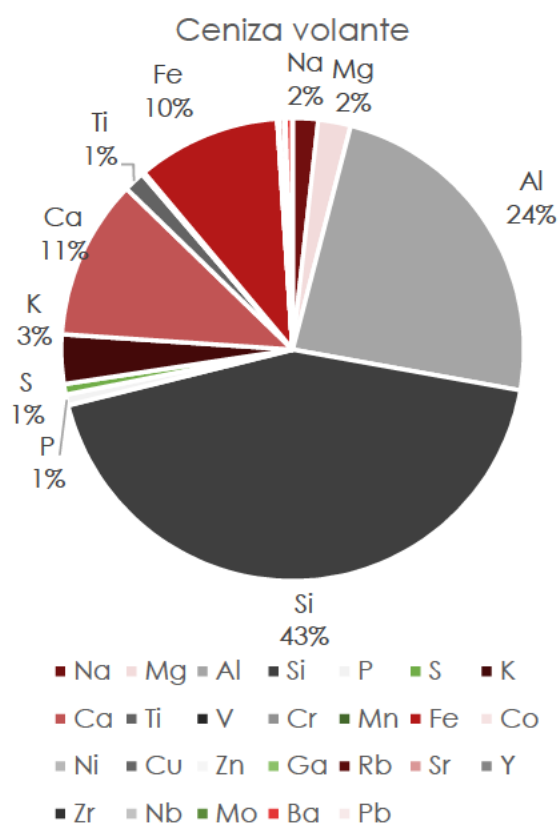


Figura 47 – Principales elementos de las CV

La **Figura 48** y la **Figura 49** muestran los resultados de los ensayos de resistencia de morteros con CV. A 7 días, la adición del 5% de CV en peso de cemento, eleva un 10% la resistencia a compresión y un 11% la flexión, pero al seguir el proceso de curación a 28 días, los resultados son estadísticamente iguales a los del mortero de referencia, esto lleva a pensar que el proceso de curación de la CV, a esta proporción, es más rápido que el del cemento.

Con una adición del 10% los resultados oscilan, tanto a 7 como a 28 días, a compresión y tracción, en  $\pm 4,5\%$  esto convierte a esta adición en capaz de sustituir el cemento sin alterar significativamente los resultados, al ser medioambientalmente

más sostenible que el cemento, se considera, a la adición de CV, en 10%, como positiva para este proyecto.

La adición del 20% reduce la resistencia, tanto a flexión como a compresión.

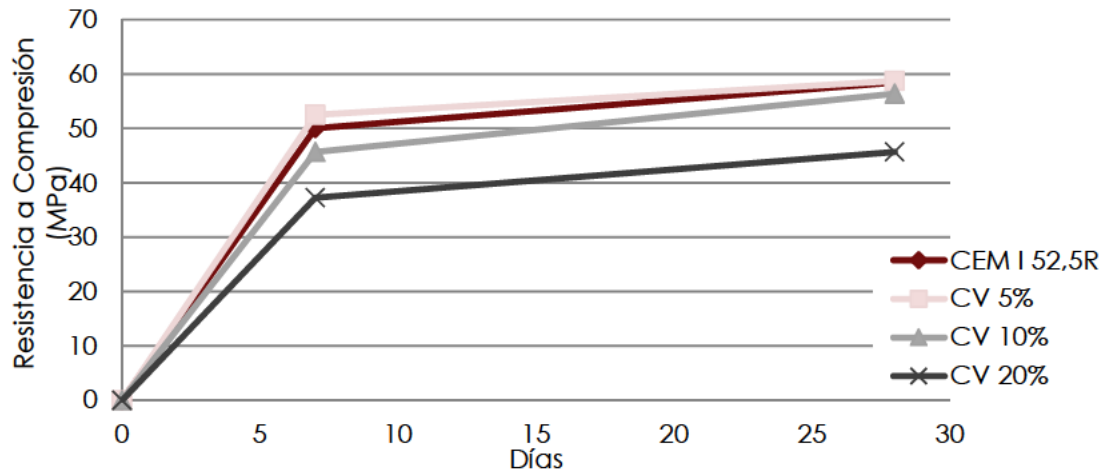


Figura 48- Datos de resistencia a compresión de la CV

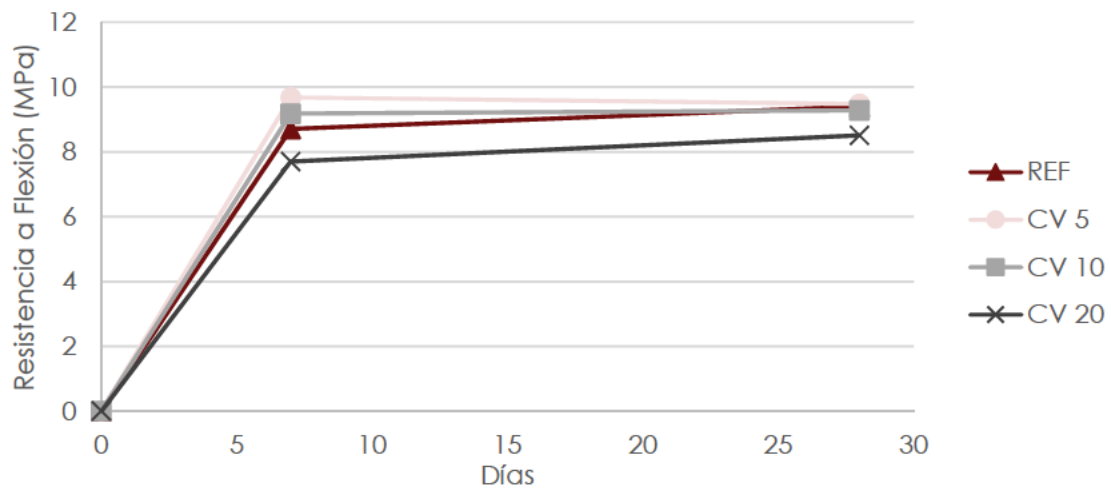


Figura 49- Datos de resistencia a flexión de la CV

El análisis termogravimétrico de la CV (**Figura 51**) muestra que de 100 °C a 570 °C hay una pérdida significativa de peso cercana al 3%, este cambio drástico de pendiente en la curva posiblemente sea debido a la evolución de derivados del carbono.

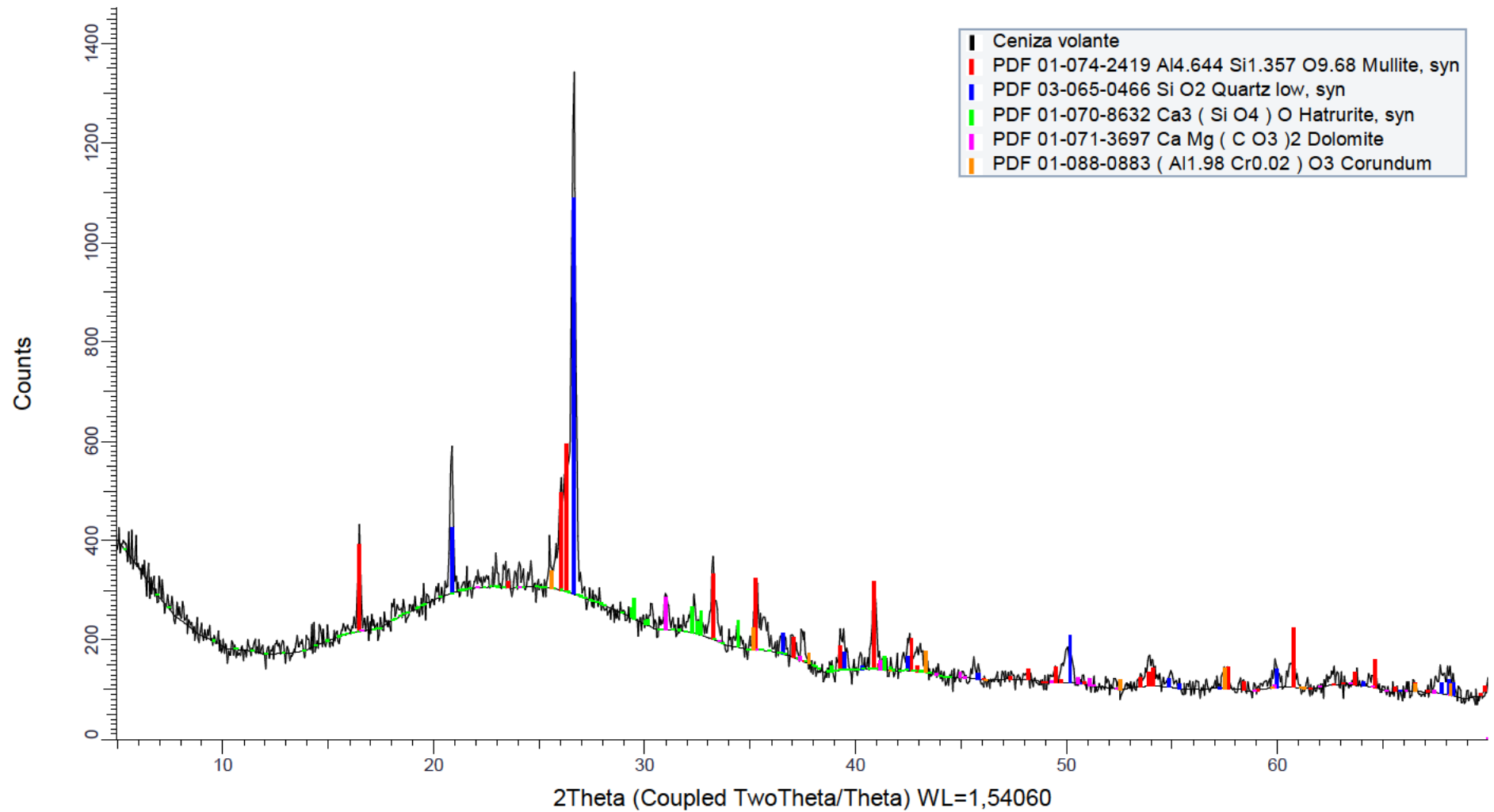


Figura 50 – Análisis DRX de las CV

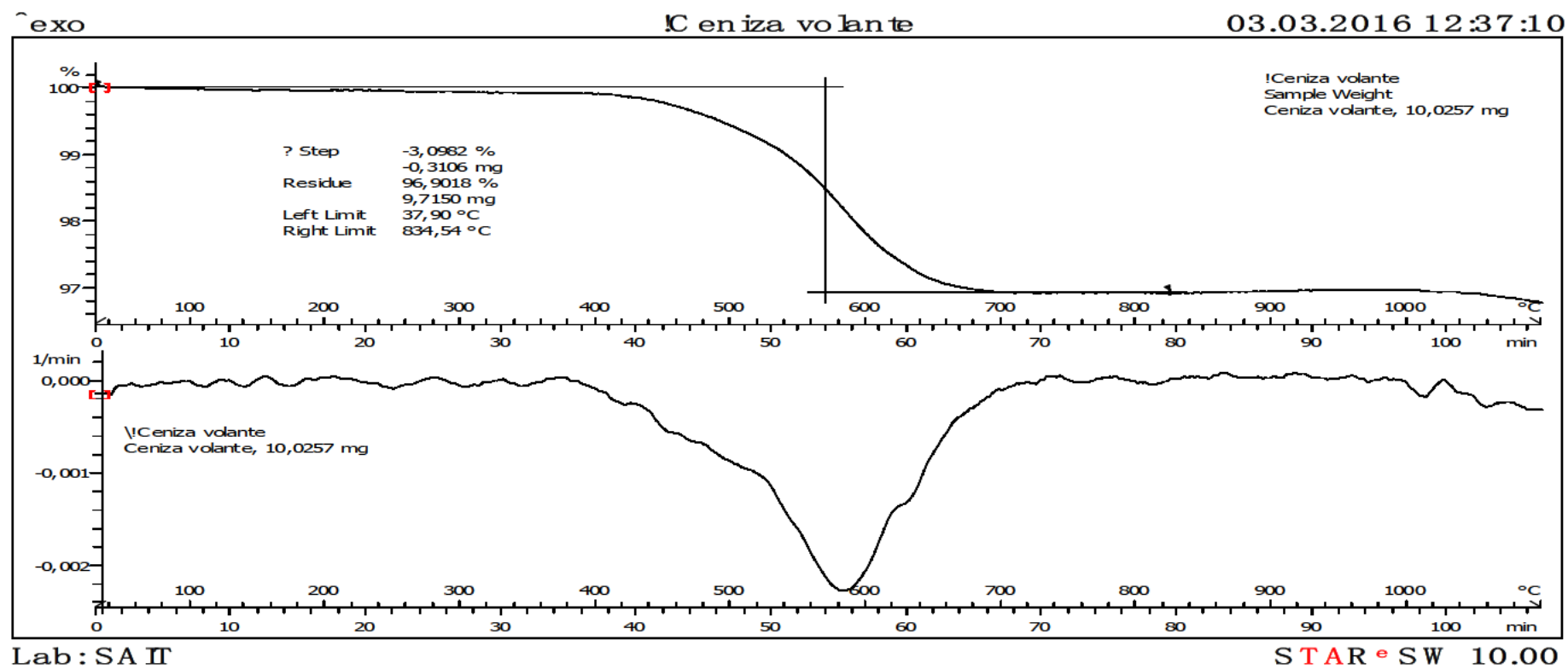
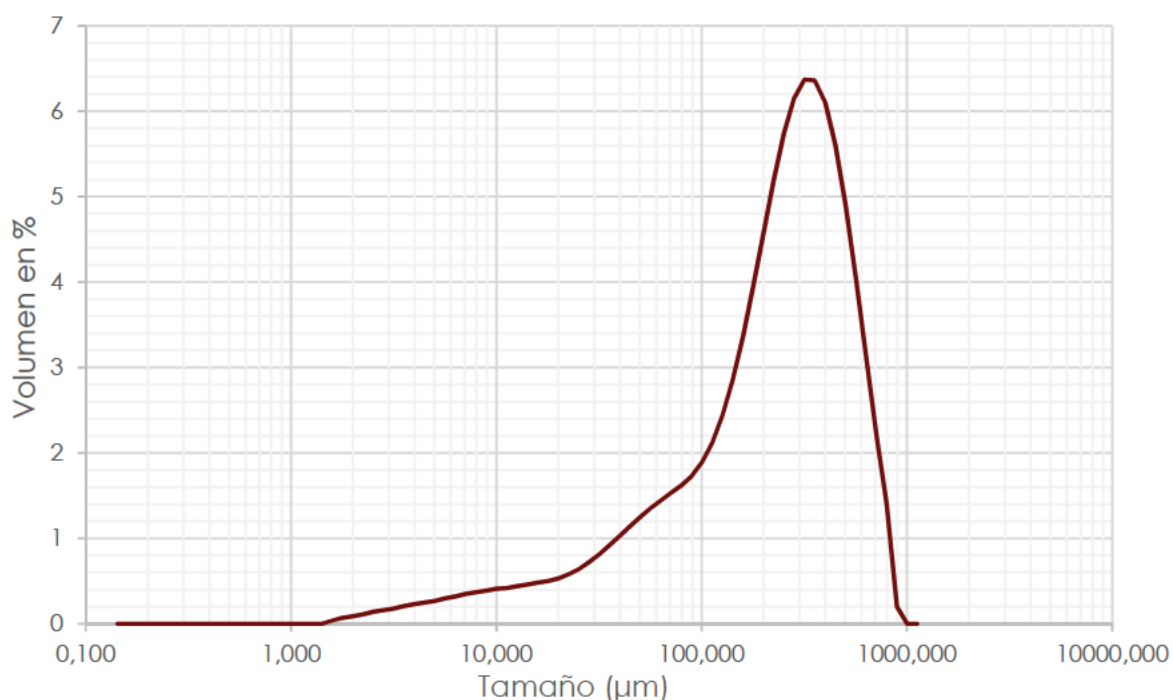


Figura 51- ATG de la CV

## 4B2B. HUMO DE SÍLICE (HS)

En la **Figura 52** se muestra la distribución de tamaño de partículas del HS. Se observa como la curva se desplaza marcadamente hacia la derecha debido a que el tamaño de partícula es notablemente superior al de los anteriores materiales, el tamaño con más presencia es de 356  $\mu\text{m}$  y el rango de diámetros entre 1.5 y 1000  $\mu\text{m}$ .



**Figura 52-** Distribución de tamaño de partícula del HS

El difractograma de Rayos X (DRX), en la **Tabla 46** y **Figura 54**, indica que su composición mineralógica es de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y moissanita ( $\text{SiC}$ ). Ambos con gran cantidad de silicio que como se observa en los resultados del ensayo FRX (**Tabla 47** y **Figura 53**) es el elemento fundamental del HS.

**Tabla 46 -** Análisis estructural del HS por difracción de rayos X de la parte cristalina

Concentraciones en % (p/p)	
Fases	Humo de sílice
<b>Óxidos</b>	<b>21</b>
Cuarzo	21
<b>Otros</b>	<b>79</b>
Moissanita	79
Cristalinidad (%)	3
Suma (%)	100



Tabla 47 – Resultados del ensayo de FRX del HS

Concentraciones en %	
Elementos	Humo sílice
PF	2,8700
O	51,0556
Na	0,1100
Mg	0,1650
I	0,2420
Si	43,8800
P	0,0440
S	0,0835
Cl	0,0140
K	0,6640
Ca	0,7214
Ti	0,0057
Mn	0,0179
Fe	0,0901
Cu	0,0060
Zn	0,0078
Se	0,0018
Rb	0,0036
Sr	0,0039
Zr	0,0006
Pb	0,0103
Bi	0,0028
Suma (%)	100,0000
Masa (g)	10,00

Los valores en rojo provienen del análisis térmico. PF es la pérdida al fuego en el rango 30–1100 °C.

O es el oxígeno estequiométrico de los elementos en el rango Na–Ba

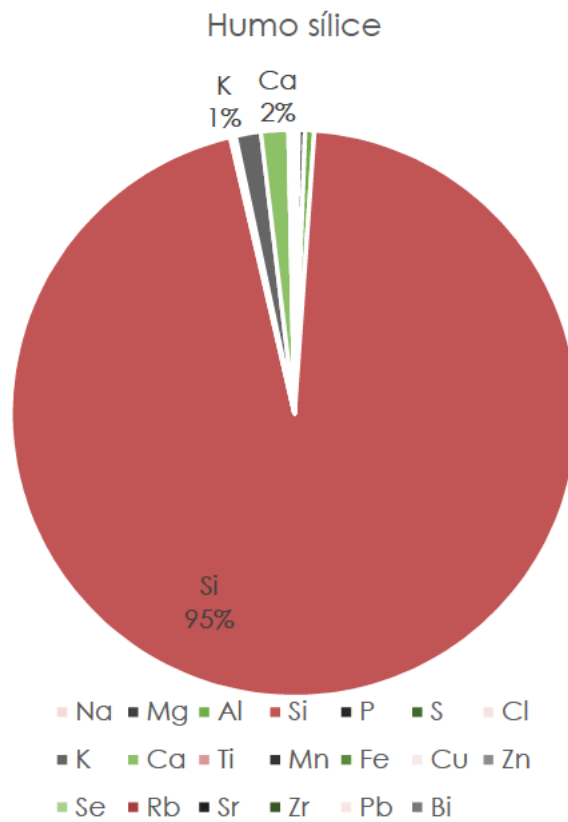


Figura 53- Principales elementos del HS

La pérdida de peso del análisis termogravimétrico, en la **Figura 55**, es de aproximadamente un 3% con un solo pico alrededor de los 450°C que puede deberse a la transformación del cuarzo- $\alpha$  en cuarzo- $\beta$ .

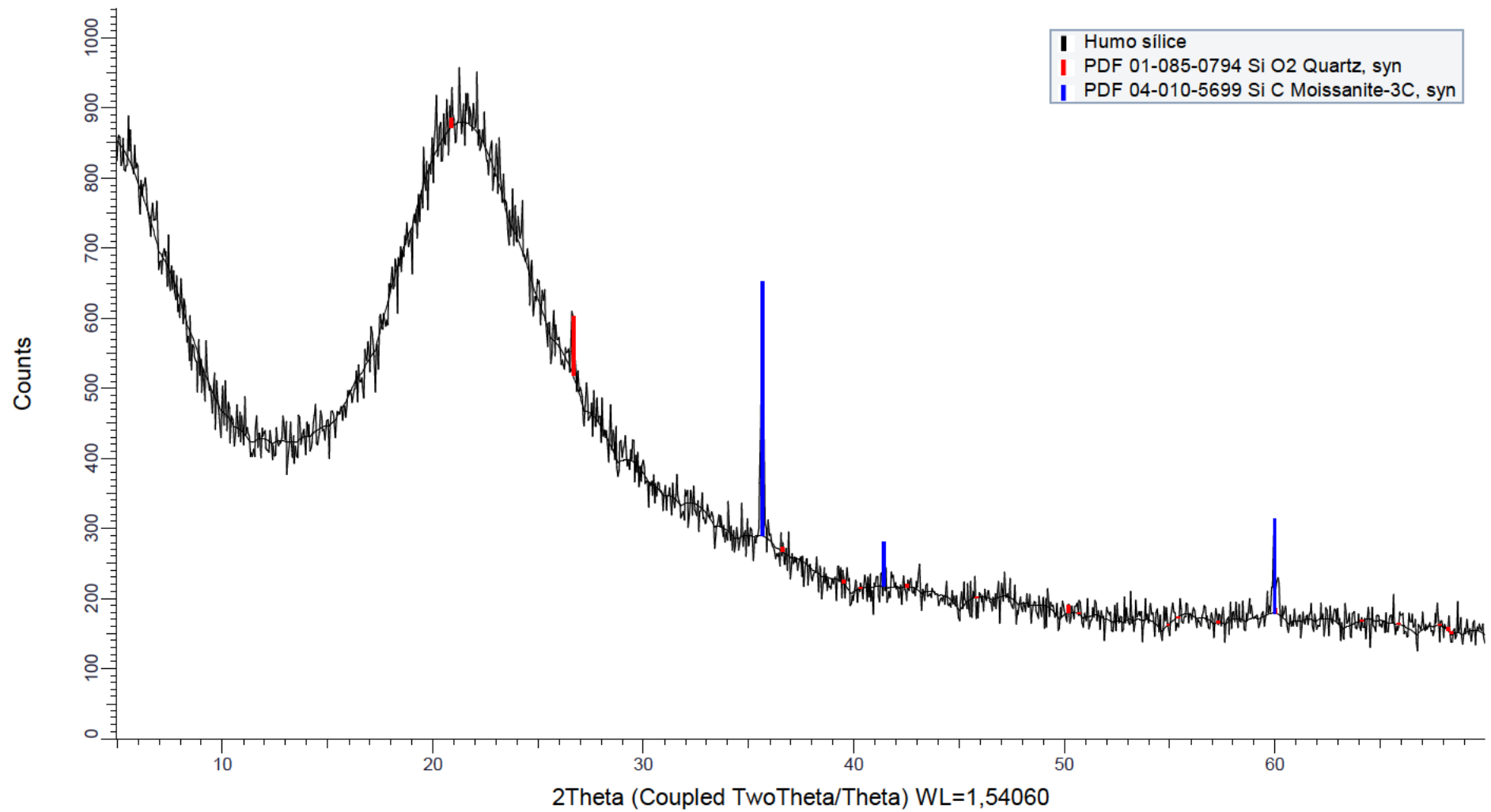


Figura 54 – Análisis DRX del HS

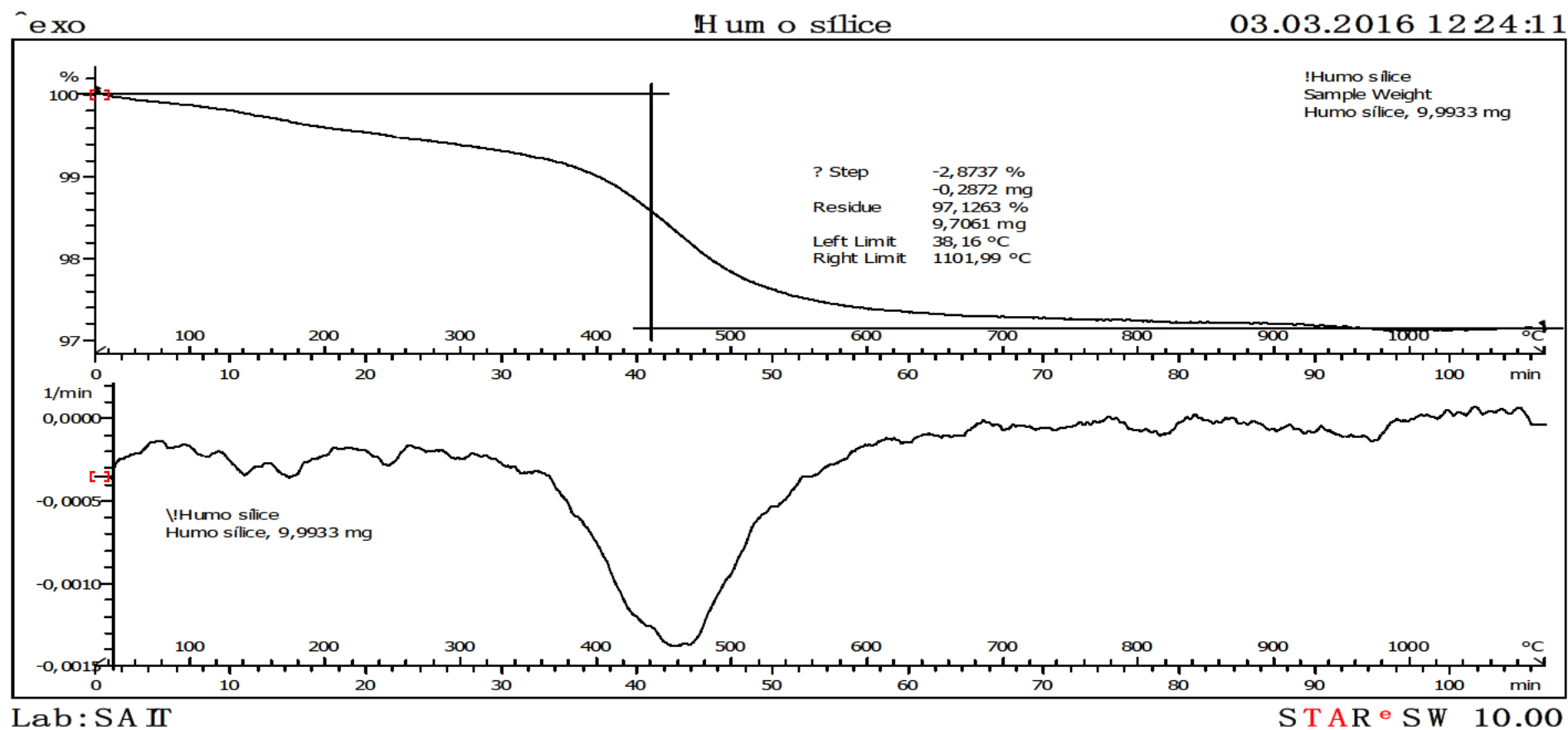


Figura 55 - ATG del HS

En la **Figura 56** y **Figura 57** se representan los resultados de los morteros con HS. Estos muestran que la sustitución de cemento por HS no es positiva y no justifica su uso en los hormigones definitivos. Este hecho puede verse justificado por la granulometría que se comentará más adelante en el análisis comparado de las adiciones.

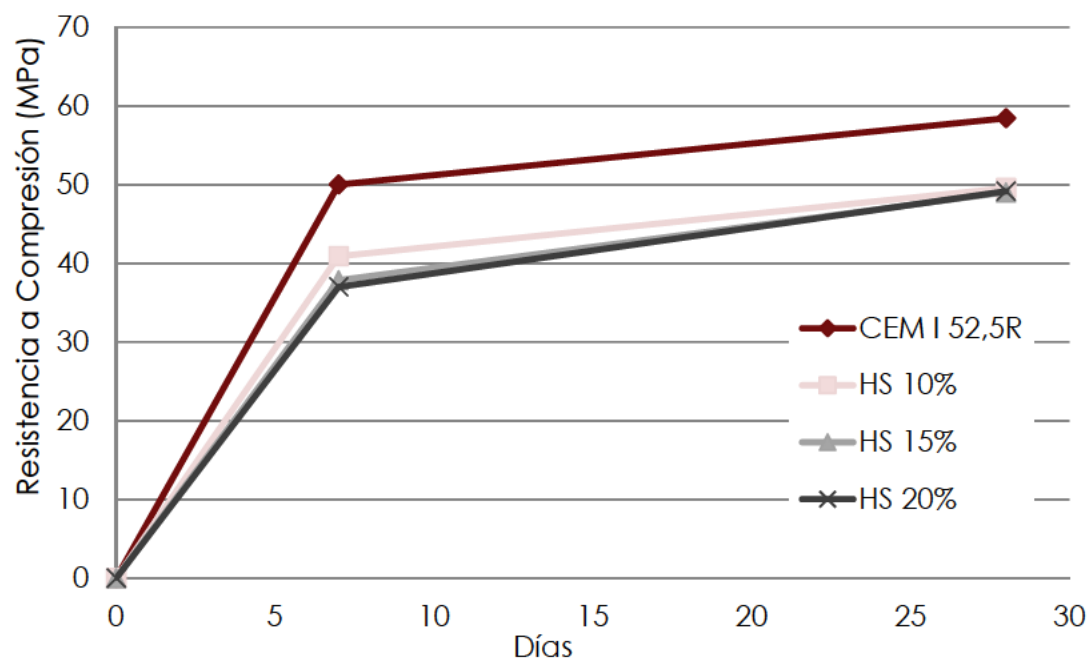


Figura 56 - Datos de resistencia a compresión

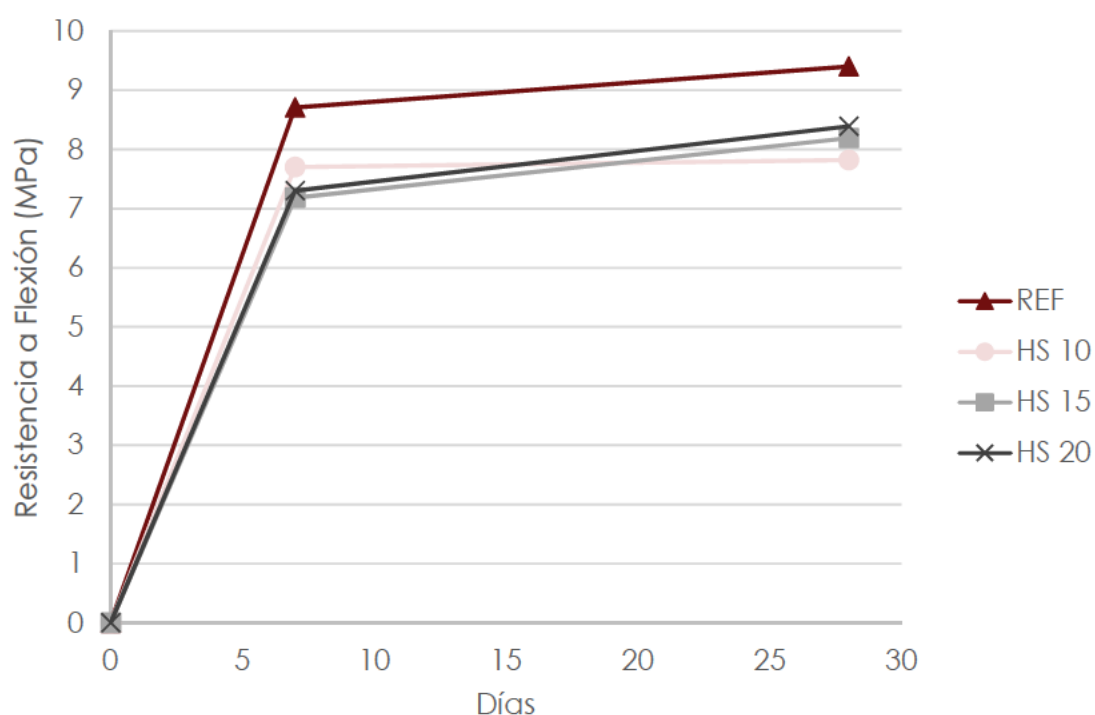
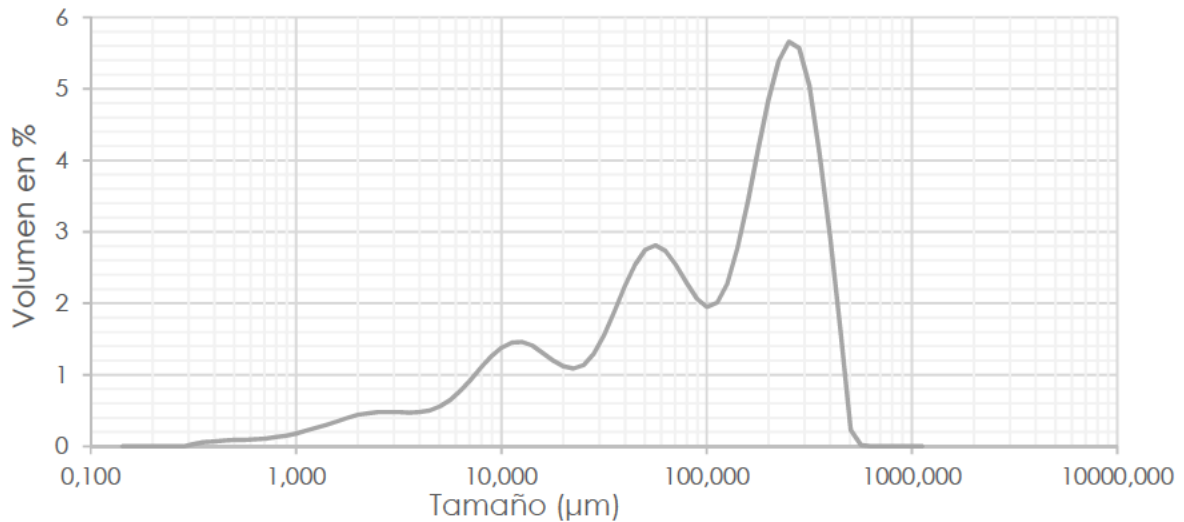


Figura 57 - Datos de resistencia a flexión

#### 4B2C. LODOS DE PAPEL SIN CALCINAR Y CALCINADOS

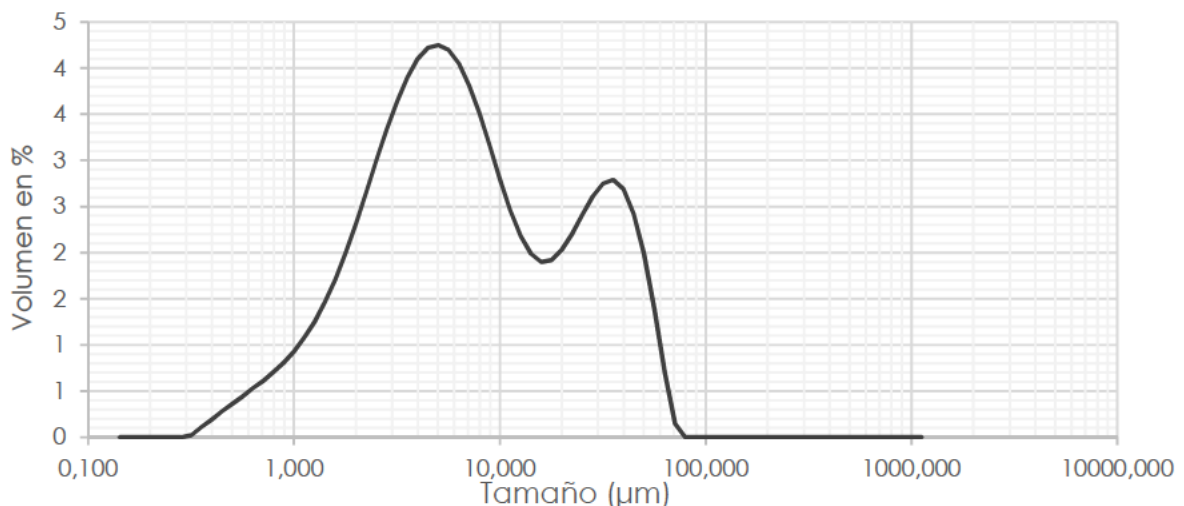
Se analizarán en este punto los lodos de papel sin calcinar, secados en estufa y los lodos calcinados en horno de mufla a 800°C durante 2 horas.

La distribución del tamaño de partículas de los lodos sin calcinar (**Figura 58**) es similar al del HS (tamaño mayoritariamente grande) pero más irregular, presentando otros tamaños menores con bastante contenido.



**Figura 58-** Distribución de tamaño de partícula de los lodos sin calcinar

El tamaño de partícula (**Figura 59**) se reduce notablemente al calcinar los lodos, siendo ahora los tamaños más similares a la CV o al cemento, el pico mayoritario es de 4,5 µm.



**Figura 59-** Distribución de tamaño de partícula de los lodos calcinados

El estudio mineralógico de la **Tabla 48** y **Figura 64** muestran que el principal compuesto es el carbonato cálcico. Al calcinarlos (**Tabla 49** y **Figura 65**) se da la formación de óxidos, fosfatos y porlandita.

La composición química determinada por fluorescencia de rayos X (FRX) de la **Tabla 50** y **Figura 60** muestran en los lodos sin calcinar un elevado contenido en calcio que se mantiene al calcinar la muestra (**Tabla 51** y **Figura 61**)

Tabla 48 - Análisis estructural del lodo sin calcinar por difracción de rayos X de la parte cristalina

Concentraciones en % (p/p)	
Fases	Lodos sin calcinar
<b>Carbonatos</b>	<b>100</b>
Calcita	100
Cristalinidad (%)	71
Suma (%)	100

Tabla 49 - Análisis estructural del lodo calcinado por difracción de rayos X de la parte cristalina

Concentraciones en % (p/p)	
Fases	Lodo Calcinado
<b>Óxidos</b>	<b>56</b>
Perovskita	29
Oxido de Ca	27
<b>Fosfatos</b>	<b>28</b>
Hidroxilapatita	28
<b>Otros</b>	<b>16</b>
Portlandita	16
Cristalinidad (%)	69
Suma (%)	100

Tabla 50 – Resultados del ensayo de FRX del lodo sin calcinar

Concentraciones en %	
Elementos	Lodos Sin Calcinar
PF	68,4600
O	10,4503
Na	0,7420
Mg	0,4210
Al	0,8260
Si	0,5570
P	0,7440
S	0,5450
Cl	0,1700
K	0,2430
Ca	16,5400
Ti	0,0673
Cr	0,0025
Mn	0,0147
Fe	0,1060
Ni	0,0013
Cu	0,0074
Zn	0,0214
Br	0,0171
Sr	0,0425
Zr	0,0035
Mo	0,0016
Ag	0,0044
Ba	0,0120
Suma (%)	100,0000
Masa (g)	1,7000

Los valores en rojo provienen del análisis térmico. PF es la pérdida al fuego en el rango 30–1100 °C.

O es el oxígeno estequiométrico de los elementos analizados por FRX

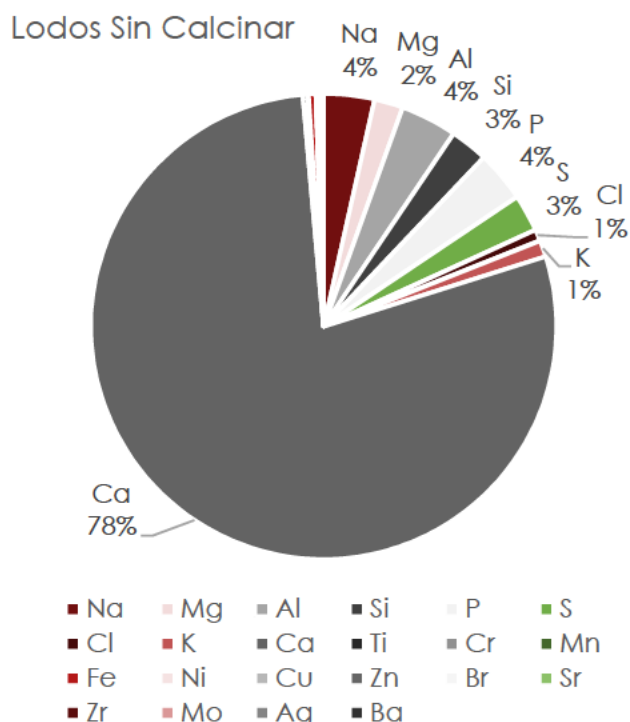


Figura 60 – Principales elementos del Lodo sin calcinar



Tabla 51 – Resultados del ensayo de FRX del lodo calcinado

Concentraciones en %

Elementos	Lodo Calcinado
PF	15,7700
O	27,9816
Na	2,1100
Mg	1,7000
Al	2,5200
Si	1,7200
P	2,0400
S	0,8360
Cl	0,1760
K	0,4520
Ca	43,9100
Ti	0,1760
Cr	0,0370
Mn	0,0330
Fe	0,4360
Cu	0,0219
Zn	0,0300
Sr	0,0367
Zr	0,0018
Ag	0,0120
Suma (%)	100,0000
Masa (g)	0,0132

Los valores en rojo provienen del análisis térmico. PF es la pérdida al fuego en el rango 30–1100 °C. O es el oxígeno estequiométrico de los elementos analizados por FRX

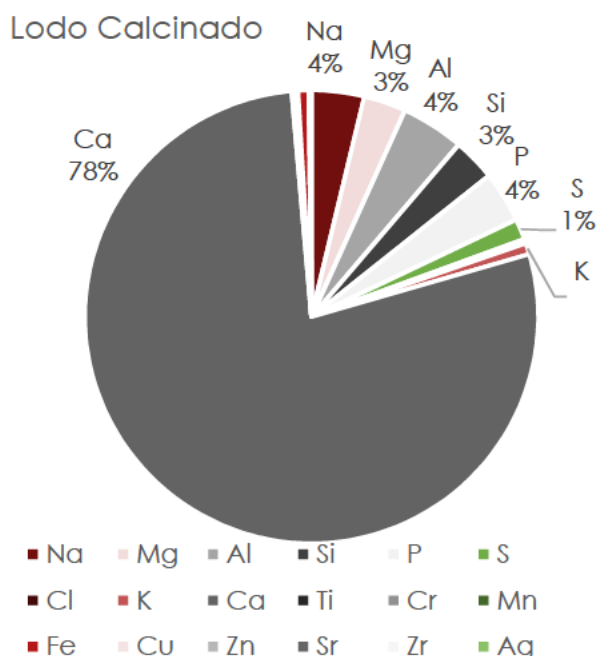


Figura 61 – Principales elementos del Lodo calcinado

En la **Figura 66** y **Figura 67**, se muestran los análisis termogravimétricos de los lodos. El ATG de los lodos sin calcinar nos ofrece información sobre lo ocurrido durante la calcinación de estos, en los que el material pasa de ser mayoritariamente calcita, a estar formado por cuatro compuestos (correspondientes a los 4 picos del ATG) entre los que se encuentra la portlandita que lo convierte en material reactivo puzolánicamente.

El uso como aditivo de lodos de papel, con y sin calcinar, es analizado en la **Figura 62** y la **Figura 63**. La resistencia de los morteros con un 1.5% de lodos sin calcinar se ve reducida una media de un 15% a compresión y flexión y con un 3% de lodos sin calcinar esta reducción aumenta a un 44%. Estos resultados desaconsejan su uso en ese estado. Sin embargo, los lodos calcinados sí arrojan resultados positivos. Un 1.5% de lodos mejora, a 28 días, la resistencia a compresión, un 10.6% y si se eleva la cantidad de lodos calcinados, a un 3%, la mejora es de un 9.5 % en su resistencia a compresión y 5.5% en resistencia a flexión. Las resistencias, tanto a flexión como a compresión se elevan más a edades tempranas, siendo menor la subida tras la curación de 28 días, esto lleva a pensar en una reacción más rápida que la cemento.

La calcinación de lodos conlleva que pase a ser un aditivo válido reactivo puzolánicamente. Este hecho puede explicarse en dos campos, el físico y el químico, el físico porque su granulometría se reduce significativamente. El tamaño máximo de partículas de los lodos sin calcinar es de  $500\mu\text{m}$ , y el tamaño más común  $270\mu\text{m}$ , mientras que el tamaño máximo de los lodos sin calcinar es  $60\mu\text{m}$  y el más común  $4.5\mu\text{m}$ , este hecho implica que el mortero sea más denso, con menos oquedades accesibles, lo que conlleva mejor comportamiento mecánico. Químicamente su transformación pasa de una elevada presencia de carbonato cálcico a que sus componentes mayoritarios sean cal y la portlandita, siendo este último muy reactivo con el cemento.

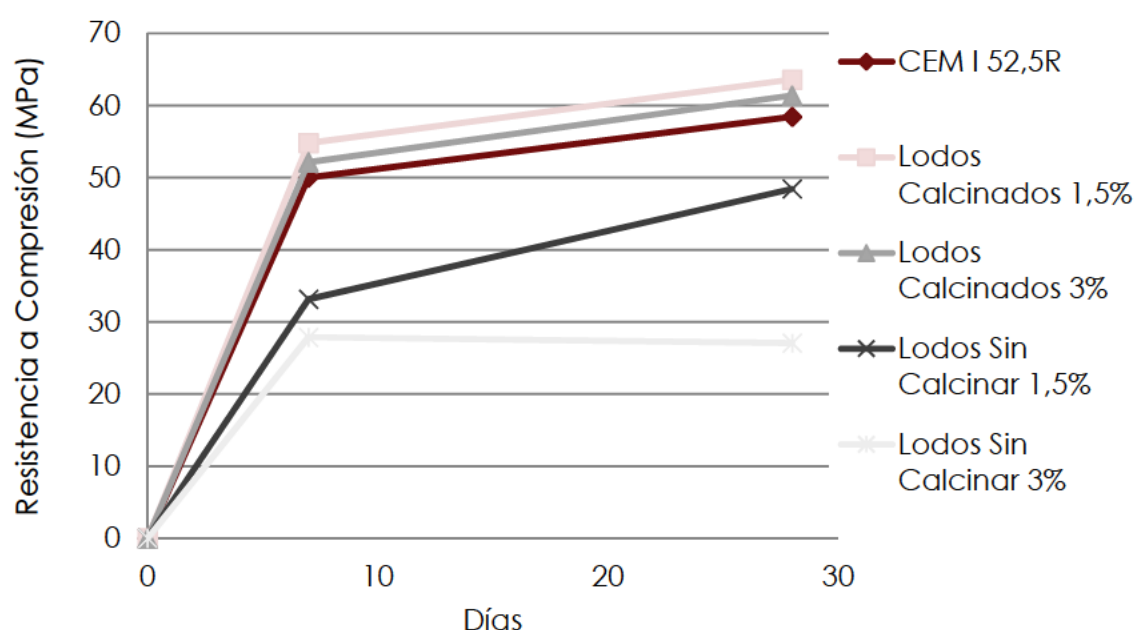


Figura 62- Datos de resistencia a compresión

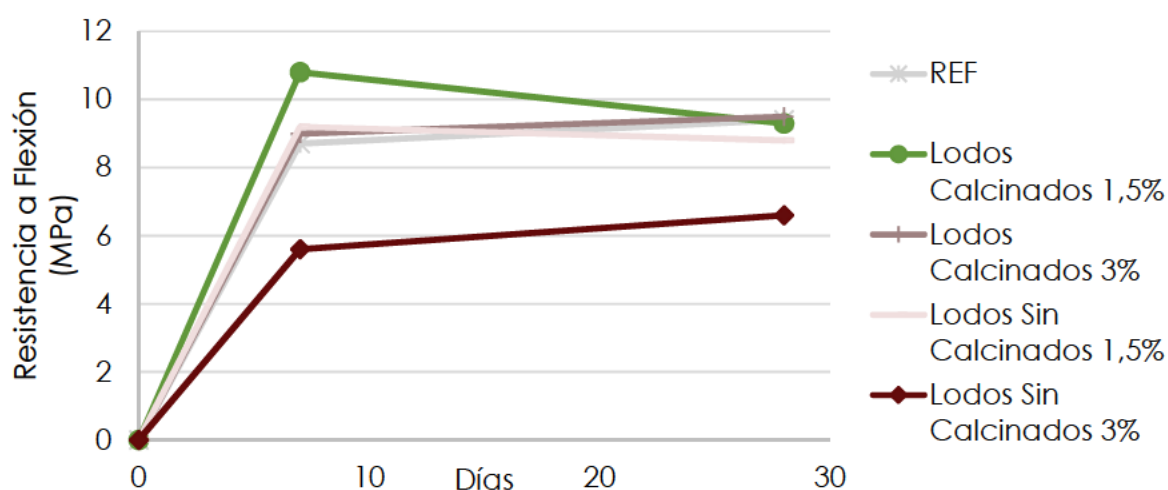


Figura 63- Datos de resistencia a flexión

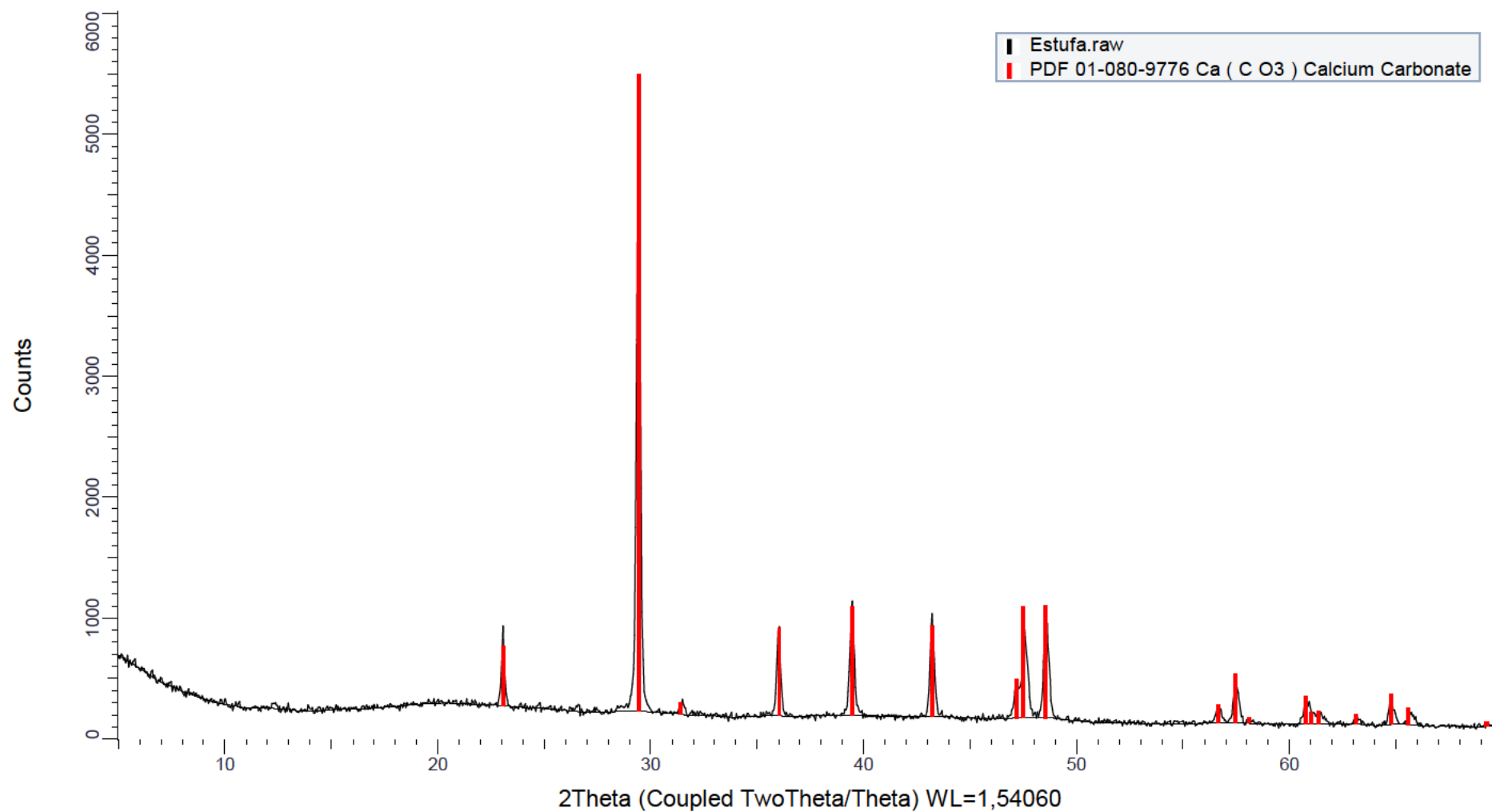


Figura 64 – Análisis DRX de los lodos sin calcinar

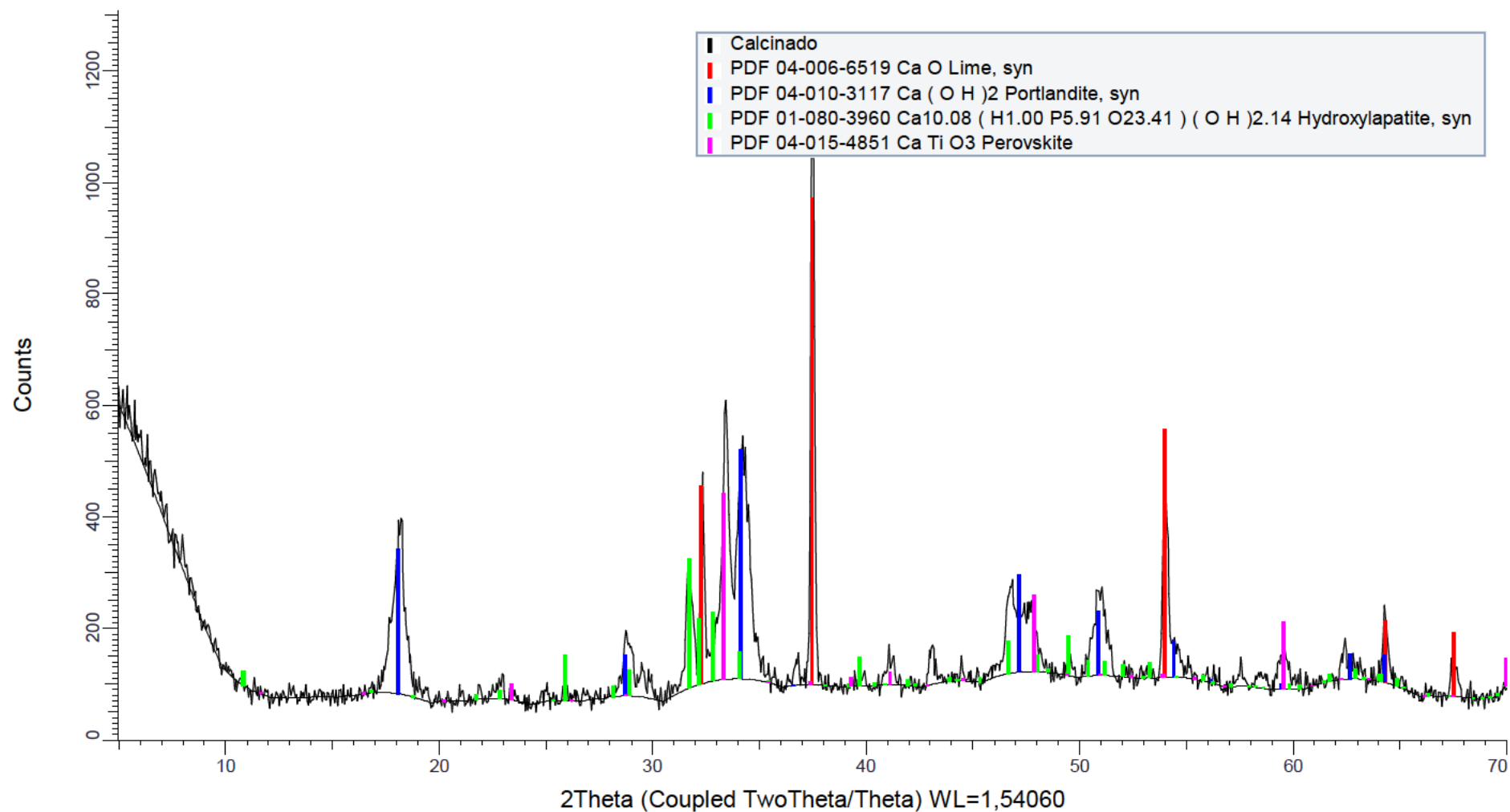


Figura 65 – Análisis DRX de los lodos calcinados

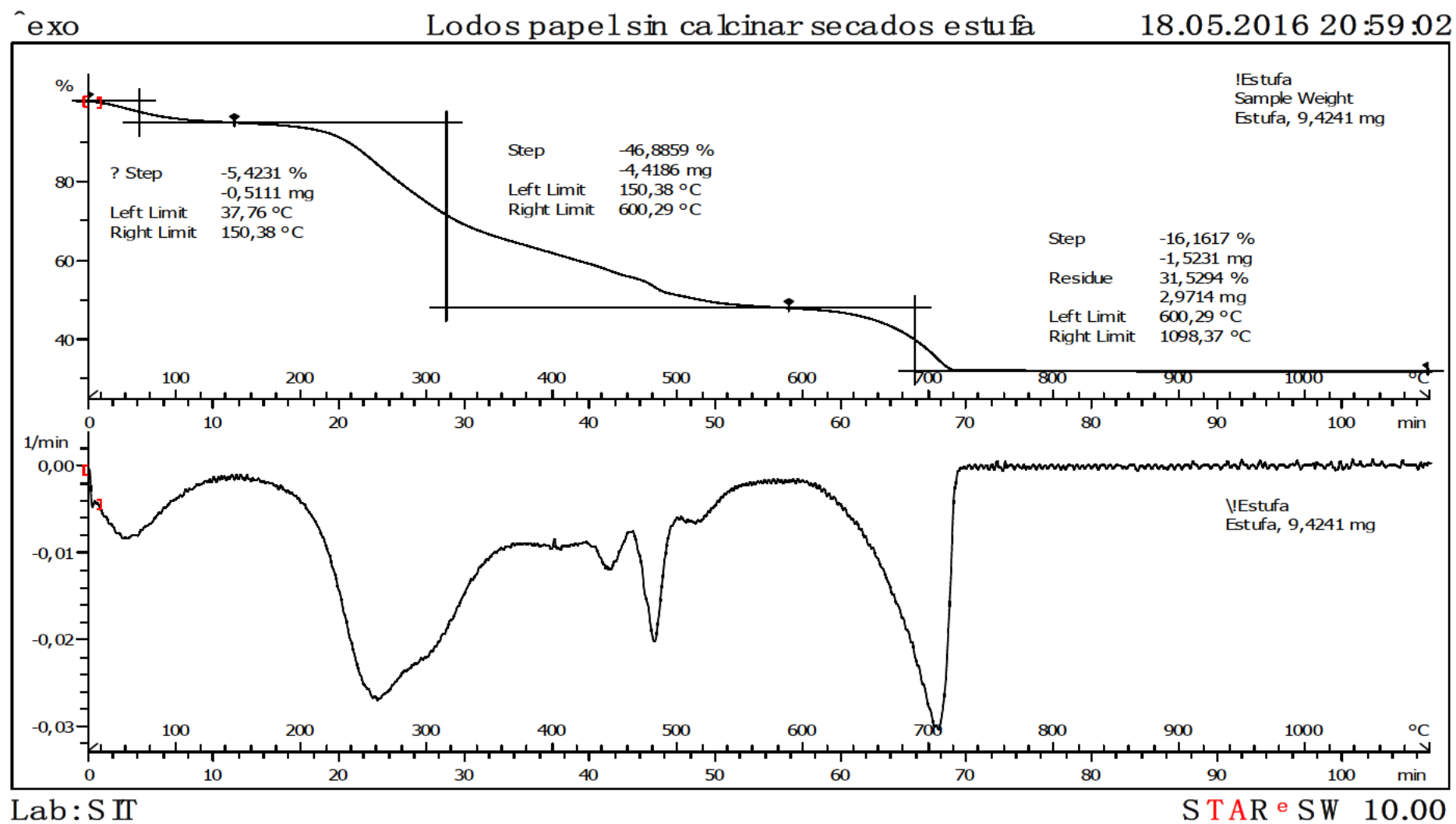


Figura 66 - ATG de los lodos sin calinar

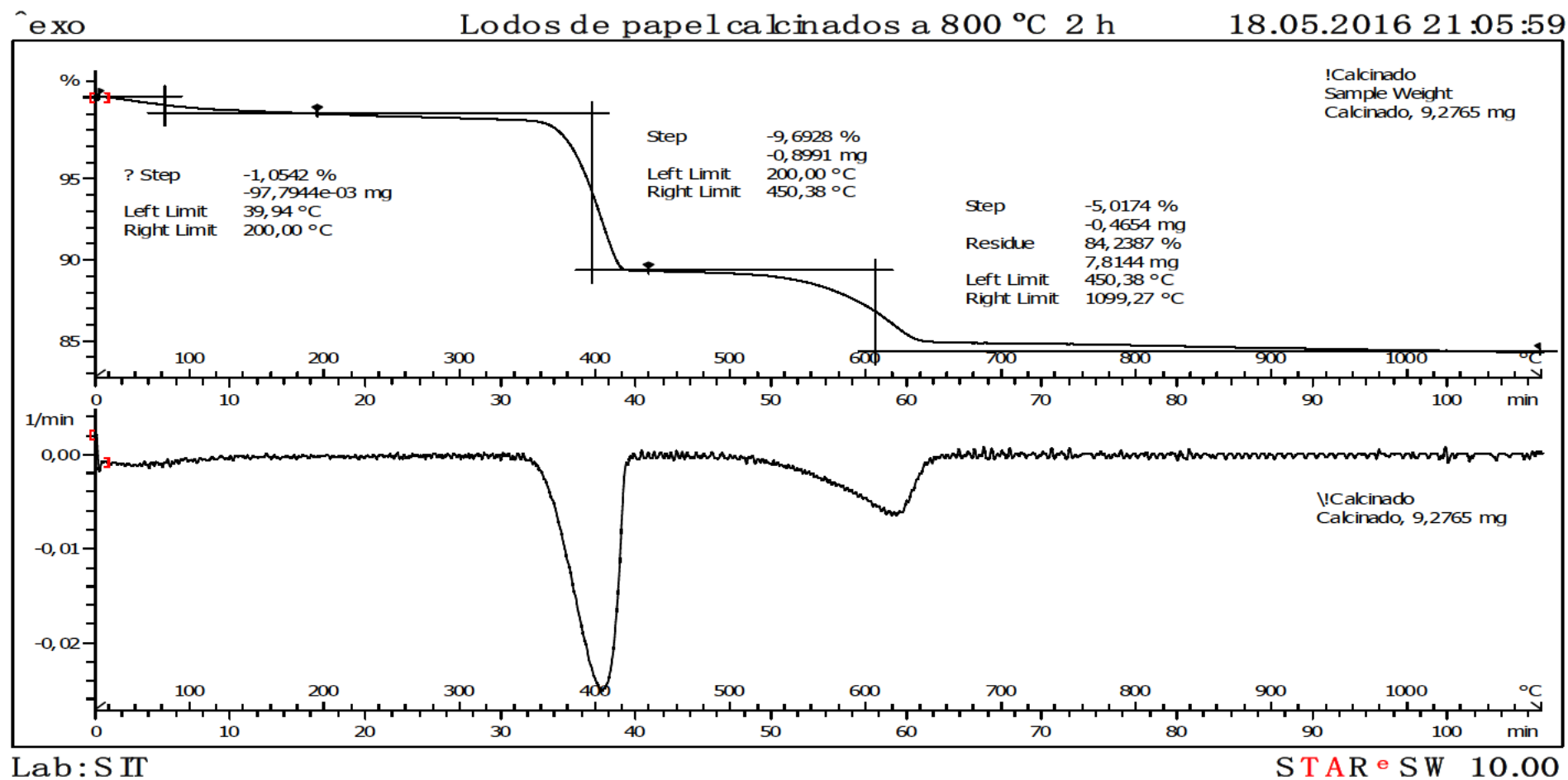


Figura 67 - ATG de los lodos calcinados



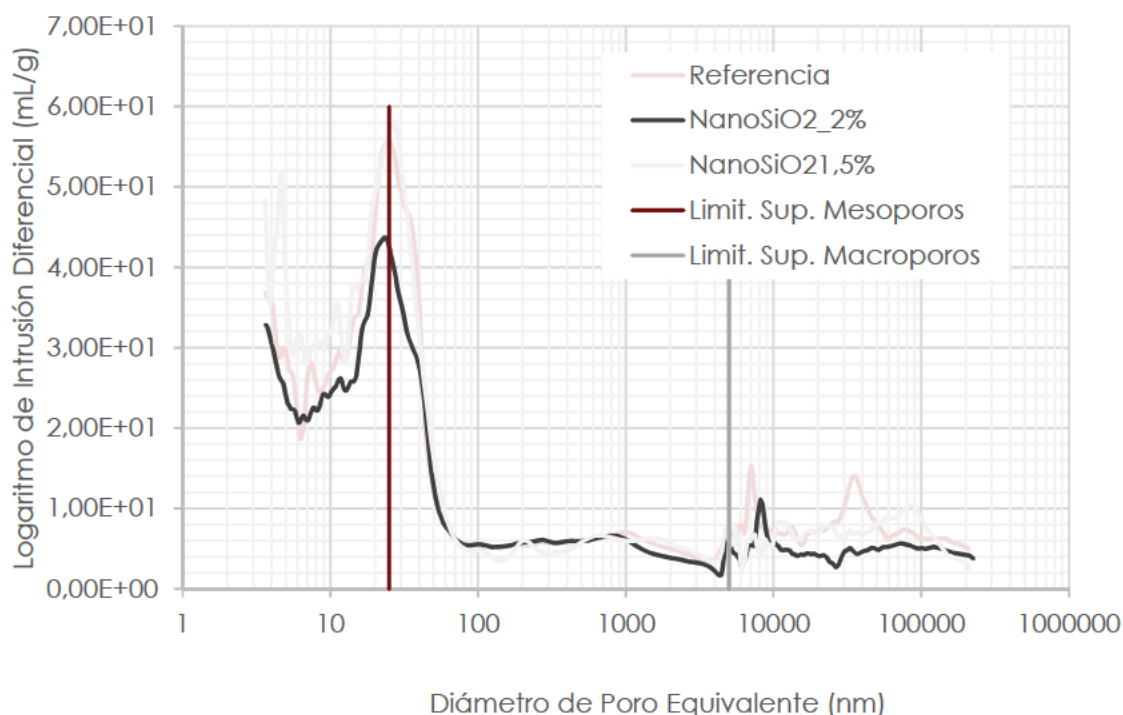
#### 4B2D. NANOSÍLICE (Ns)

El nanosílice (Ns) utilizado en la investigación, fabricado por Basf, es una mezcla en suspensión líquida de Ns amorfo con nombre comercial MasterRoc Ms 685. Las propiedades que declara el fabricante se detallan en la **Tabla 52**.

**Tabla 52** – Propiedades del Ns

Densidad, 20°C	1.134± 0.03 gr/cm <sup>3</sup>
pH, 20°C	10 ± 1
Cloruros	< 0.1%
Viscosidad, 20°C Brookfield Sp00/100rpm:	< 30 cps

El Ns actúa a nivel físico compactando la mezcla debido al tamaño de sus partículas, este aspecto es especialmente patente en el ensayo de porosimetría de mercurio al que se sometieron los morteros. En la **Tabla 53** y la **Figura 68** se muestran los resultados del ensayo. En la gráfica se observa como la mezcla con un 2% de Ns tiene menor cantidad de poros, especialmente en los poros con diámetro equivalente menor de 14nm donde la gráfica se mantiene por debajo del resto en casi todo momento. En la tabla se observa como la porosidad total efectivamente es un 2% menor que la del mortero de referencia. Los morteros con 1.5% de Ns no mostraron diferencias notables frente al mortero de referencia lo que implica que, a nivel físico, en esta proporción, el Ns no actúa de forma visible.



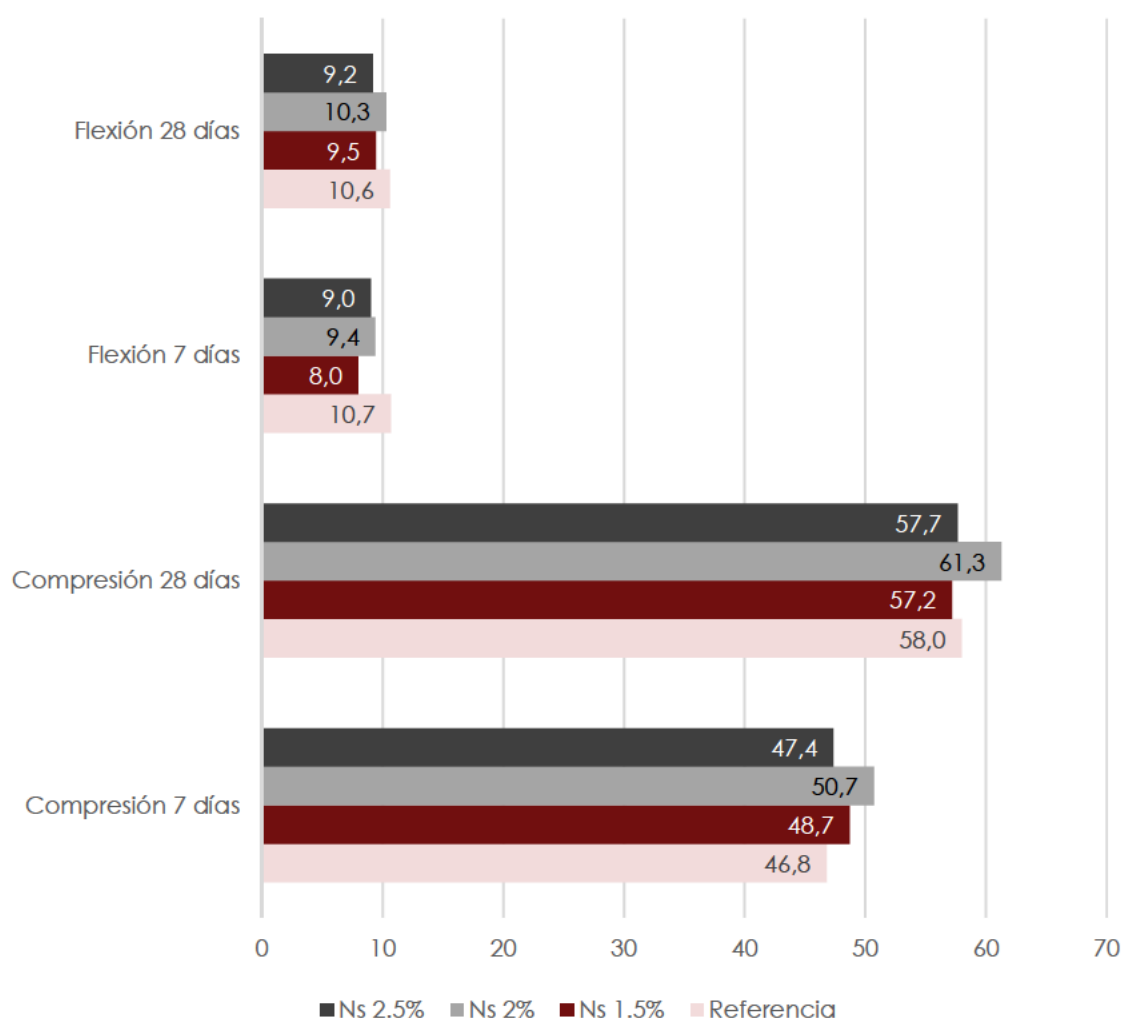
**Figura 68** – Cantidad de poros según su tamaño. Ensayo PIM

Los datos de densidad de las mezclas con Ns muestran una densificación de la mezcla.

La **Figura 69** muestra el análisis del Ns. Los datos tanto a flexión como a compresión, tanto a 7 como a 28 días, muestran que una adición de Ns del 2% del peso de cemento, eleva la resistencia. En este caso la mejora, a compresión, tras 28 días de curación, es de un 3,65% y a flexión, de un 9,57%. La adición del 2% de Ns se considera para este caso positiva en un 2%.

**Tabla 53** – Resultados del ensayo PIM, resistencia y densidad

	Porosidad Total (%)	Tamaño de poro promedio (nm)	Resist. Compresión 28 días (MPa)	Densidad aparente kg/m³	Densidad kg/m³
Referencia	13,64	0,1764	55,89	2145,3	2135,35
Ns 1,5%	14,06	0,1546	52,7	2128,3	2162,57
Ns 2%	11,44	0,1675	53,34	2208,5	2164,28



**Figura 69** – Resistencia a compresión y flexión del Nanosíllice

#### 4B2E. SUPERPLASTIFICANTE

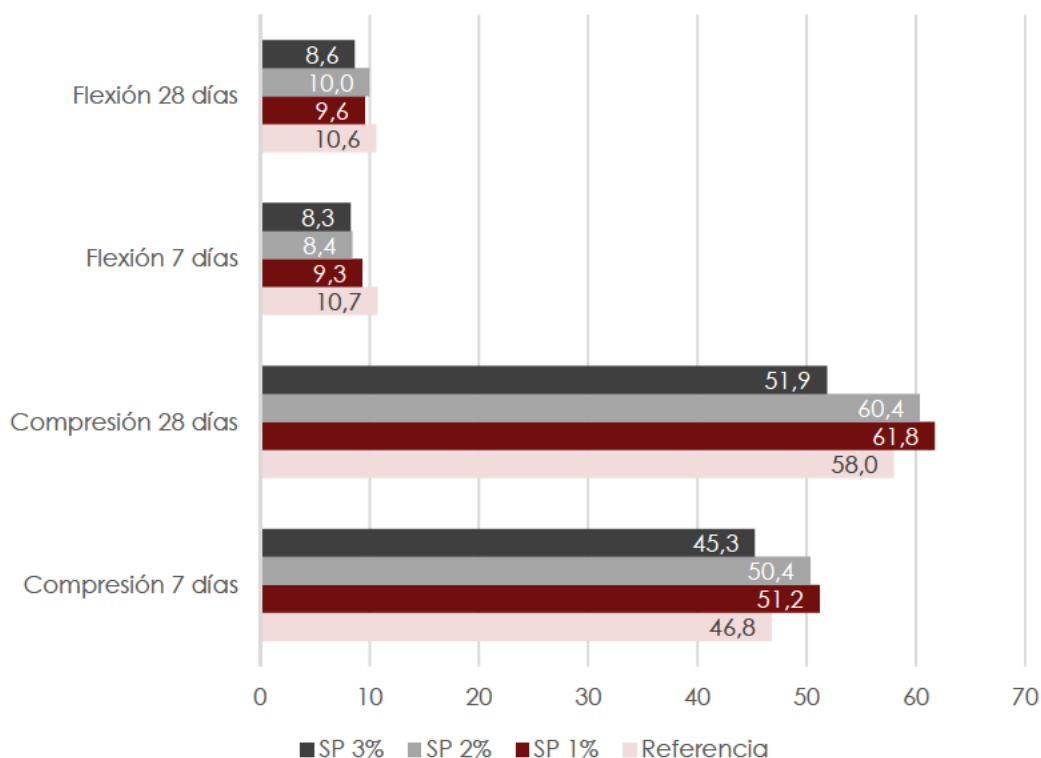
El superplastificante utilizado es del tipo de base en policarboxilatos con nomenclatura MasterGlenium ACE 459 y fabricado por Basf. Las propiedades declaradas por el fabricante se detallan en la **Tabla 54**.

**Tabla 54** – Propiedades del Sp.

Densidad, 20°C	1.050± 0.02 gr/cm <sup>3</sup>
pH, 20°C	5.5 ± 1
Cloruros	< 0.1%
Viscosidad, 20°C Brookfield Sp00/100rpm:	< 110 cps

La **Figura 70** analiza los resultados de resistencia con la incorporación de superplastificante en distintas proporciones.

Se observa como a proporciones más bajas, del 1 y 2% del peso de cemento, la resistencia, a compresión y a flexión, tras 28 días de curación, se elevan (un 3% y un 4% de media respectivamente). Mientras que, a la proporción más elevada, del 3%, la resistencia se ve mermada (12% compresión y 8% flexión). El 2% se tomará como la proporción más ajustada por conseguir reducir la proporción de agua /aglomerante sin comprometer la resistencia.



**Figura 70** – Resistencia a compresión y flexión del Superplastificante

## 4B2F. ANÁLISIS COMPARADOS

La **Figura 71** muestra las curvas granulométricas de cemento y adiciones, la **Figura 72** el análisis granulométrico láser de las mismas y la **Tabla 55** la superficie específica. Estas figuras y tabla pueden explicar los resultados de los comportamientos mecánicos de los morteros en donde las adiciones con partículas menores, más parecidas al cemento, son las que mejores resultados aportan mientras que los lodos sin calcinar o el HS (con tamaños de partículas más elevados) reducen la resistencia de los morteros.

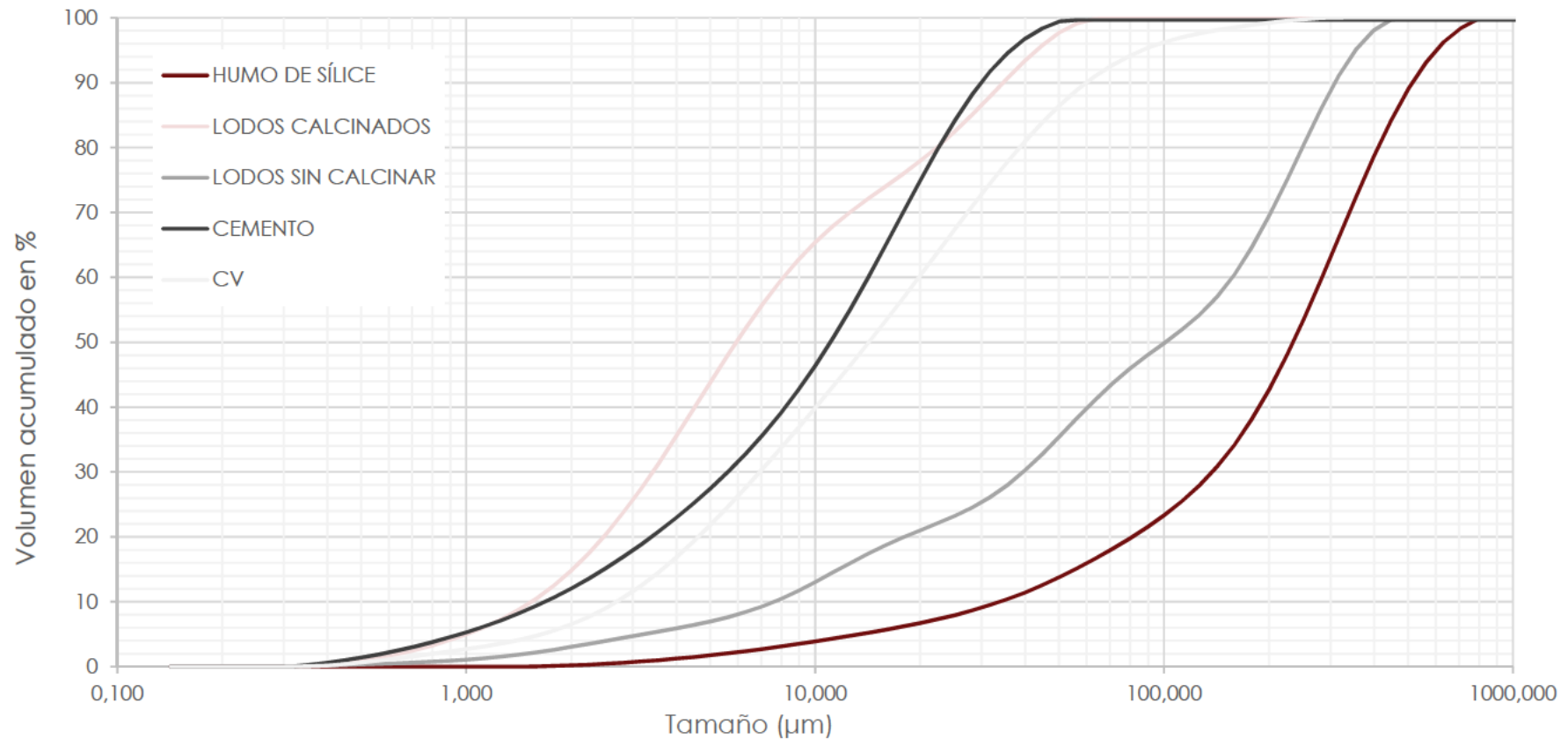


Figura 71 - Curvas granulométricas del cemento, CV, HS, lodos sin calcinar y lodos calcinados.

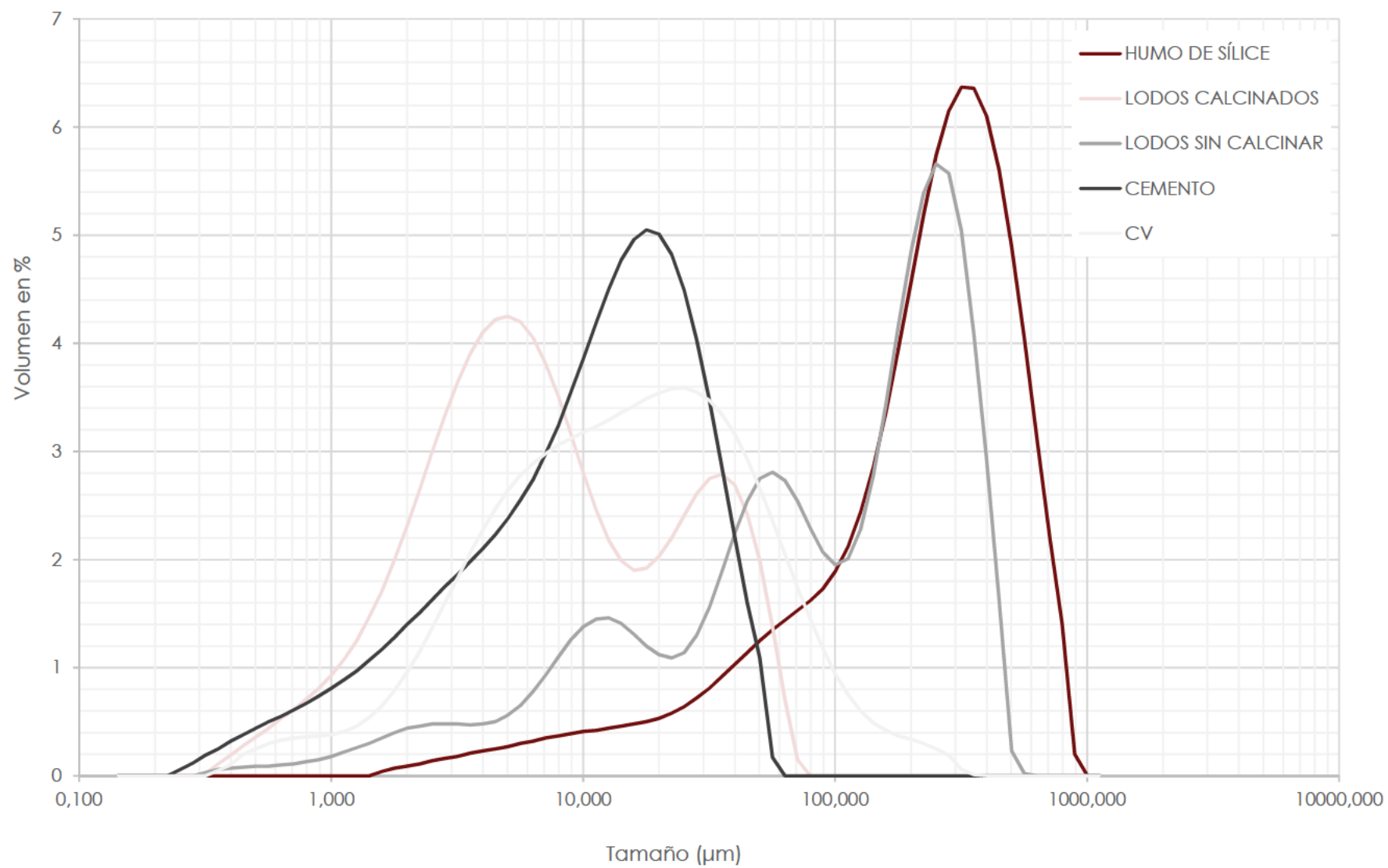
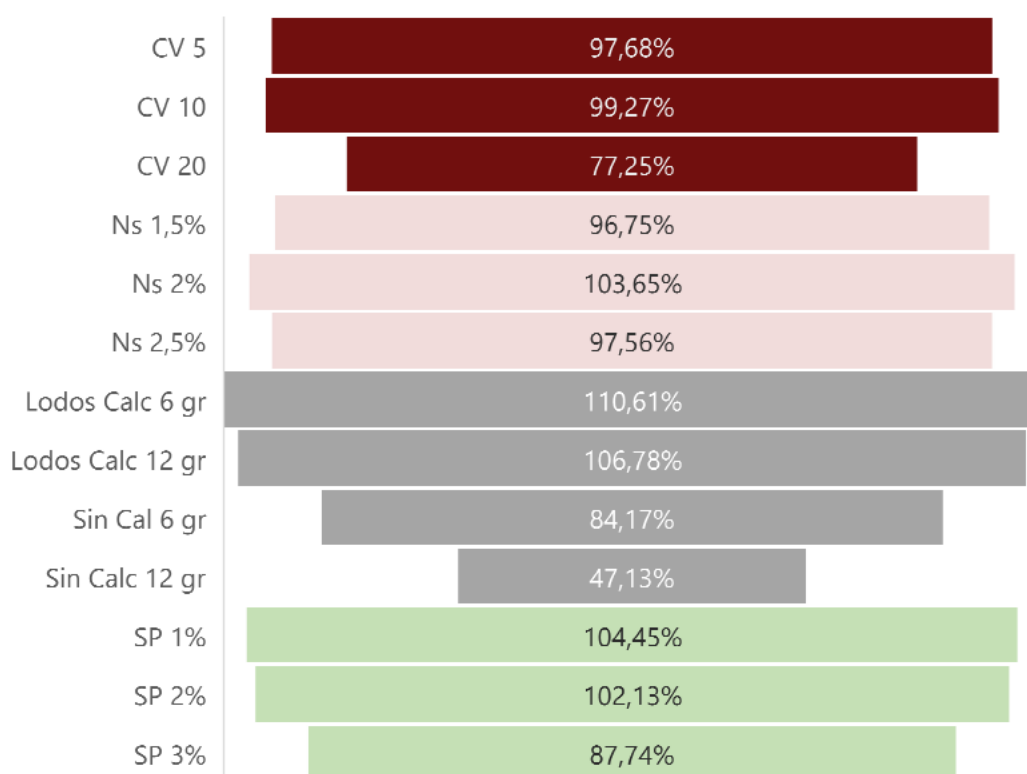


Figura 72 - Análisis granulométrico láser de las partículas cementantes

Tabla 55 - Superficie específica de las partículas cementantes

MATERIAL	SUPERFICIE ESPECÍFICA (cm <sup>2</sup> /g)
Cemento	15.200
CV	8.950
HS	932
Lodos de papel sin calcinar	3.660
Lodos de papel calcinados	17.100

A modo de conclusión, la **Figura 73** muestra los porcentajes de la resistencia a compresión, a 28 días, del mortero de referencia que alcanzan los morteros con adiciones o aditivos.



**Figura 73** – Porcentajes de la resistencia a compresión del mortero de referencia, que alcanzan los morteros con aditivos y adiciones.



#### 4B3. ÁRIDOS.

Los áridos descritos a continuación fueron los seleccionados tras la fase II de trabajo. Con los datos de la fase I se realizó un primer cribado de materiales, los que mejor comportamiento presentaron se analizaron con mayor profundidad con el fin de escoger los áridos definitivos que formarían parte del prototipo.

Se fabricaron morteros normalizados y sus similares con sustitución de áridos tradicionales por ligeros reciclados. Se les sometió a pruebas de resistencia (compresión y flexión), absorción de agua, porosimetría de mercurio y micrografía además de medir su densidad.

La granulometría de los LWA empleados es similar a la grava. Los morteros normalizados no contienen grava, esto provocó que se alterara la granulometría de los morteros de referencia con el fin de fabricar piezas equivalentes granulométricamente. Alterando la granulometría de los áridos susceptibles de ser triturados (corcho) o alterando la de los áridos tradicionales aportando grava de la misma granulometría, en la misma proporción, se consigue el volumen que se iba a sustituir de árido ligero (plásticos). (Imagen 13)

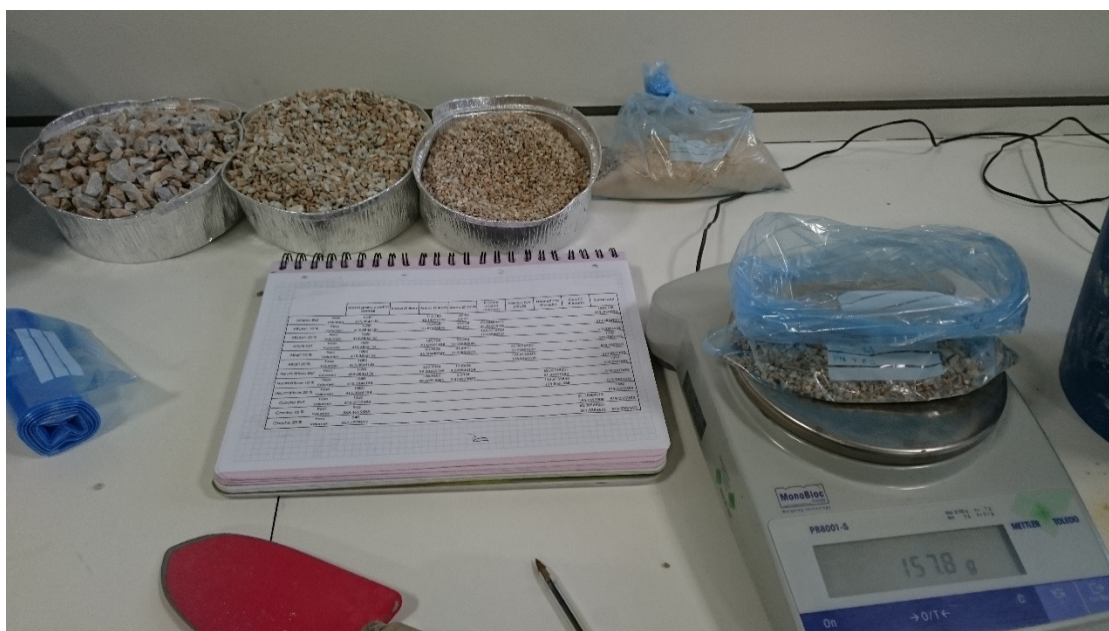


Imagen 13- Proceso de preparación de los áridos para fabricación de morteros

#### 4B3A. NEUMÁTICOS FUERA DE USO TRITURADO.

El principal componente de los neumáticos es el caucho o elastómeros, que son materiales poliméricos, cauchos hay de varios tipos, el natural y los artificiales, el natural se extrae a partir del árbol Hevea Brasiliensis. Los cauchos sintéticos más empleados en la fabricación de los neumáticos son: Estireno-Butadieno (SBR), Polibutadienos (BR) y Polisoprenos sintéticos (IR).

Durante su fabricación se someten al proceso de vulcanización, que es el proceso químico por el cual las moléculas del polímero se unen unas con otras mediante enlaces químicos para dar una estructura tridimensional en la que la difusión molecular se encuentra restringida. En 1839 Charles Goodyear descubrió un

proceso de vulcanización para el caucho natural utilizando azufre y carbonato de plomo como agentes químicos. Descubrió que cuando se calentaba una mezcla de caucho natural, azufre y carbonato de plomo el caucho pasaba de ser un material gomoso y blando a elastomérico. Este proceso fue patentado por Goodyear en el año 1844. [158]. Además del caucho, los neumáticos llevan una serie de compuestos, para los neumáticos de pasajeros (automóviles y camionetas) son los indicados en la **Tabla 56**, [159].

La granulometría del neumático triturado con el que se realizó la investigación de muestra en la **Tabla 57**.

**Tabla 56** – Principales componentes de los neumáticos

Material	Porcentaje
Caucho Natural	27%
Caucho Sintético	14%
Carbón negro	28%
Acero	14-15%
Fibra, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc.	16-17%

**Tabla 57** - Granulometría del neumático triturado

Neumáticos triturados			
Tamiz UNE 933-2:2012	Peso retenido	Retenido %	
luz en mm.	g	Parcial	Acumulado
<b>8</b>	70,4	14,0	14,0
<b>4</b>	421,3	83,8	97,8
<b>2</b>	9,7	1,9	99,7
<b>1</b>	0	0,0	99,7
<b>0,5</b>	0	0,0	99,7
<b>0,25</b>	0	0,0	99,7
<b>0,125</b>	0	0,0	99,7
PASA	1,3	0,3	100,0
MUESTRA	502,7	Módulo granulométrico	5.11

Los morteros con neumáticos triturados sustituyendo un 10% del árido tradicional en volumen, Ven reducida su resistencia en un 35% respecto del mortero normalizado y la reducción es de un 39% con 20% de sustitución. Los datos se presentan en la **Figura 74**.

En la **Imagen 14** se observa el material a diferentes escalas.

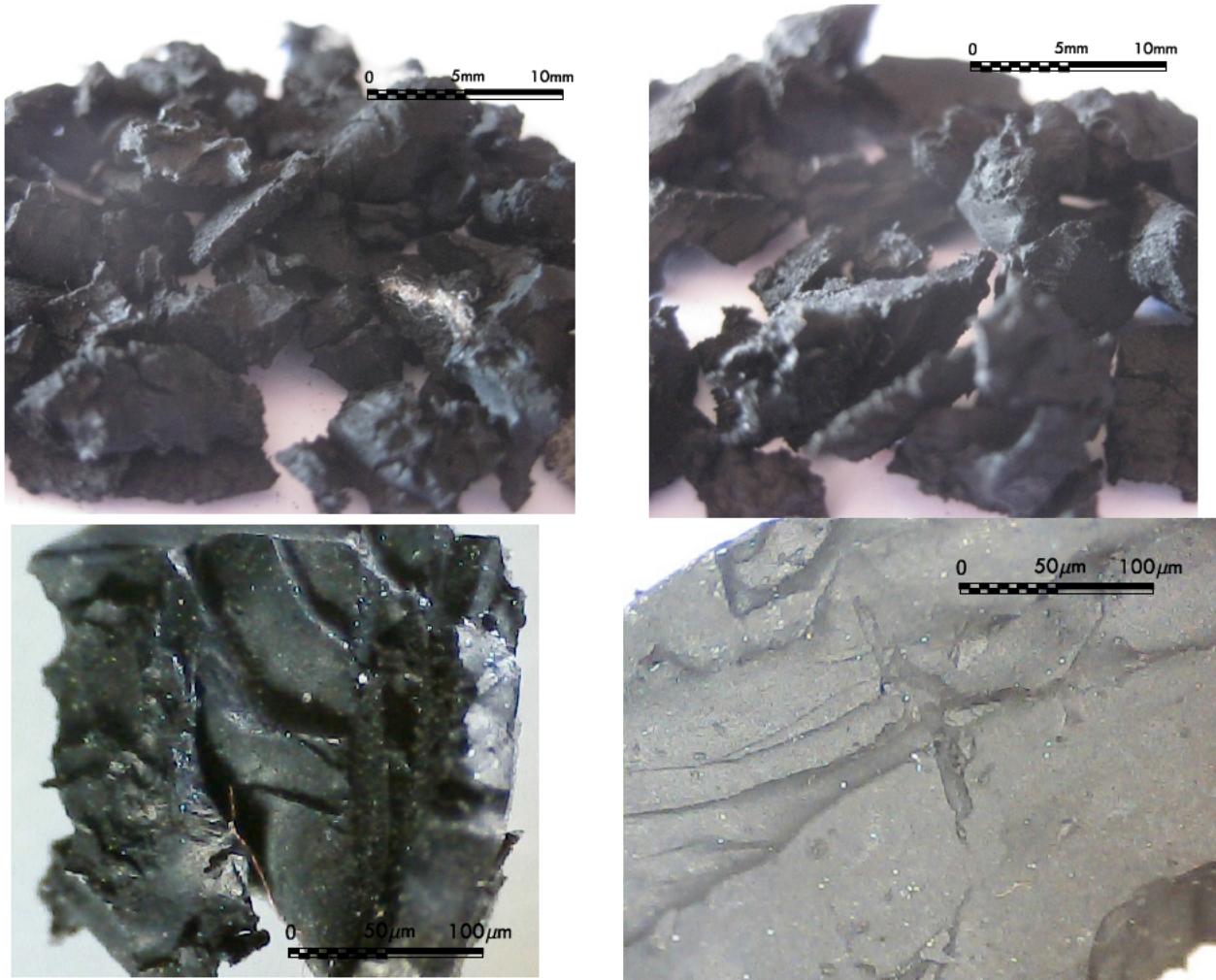


Imagen 14 - Micrografía a diferentes escalas del neumático

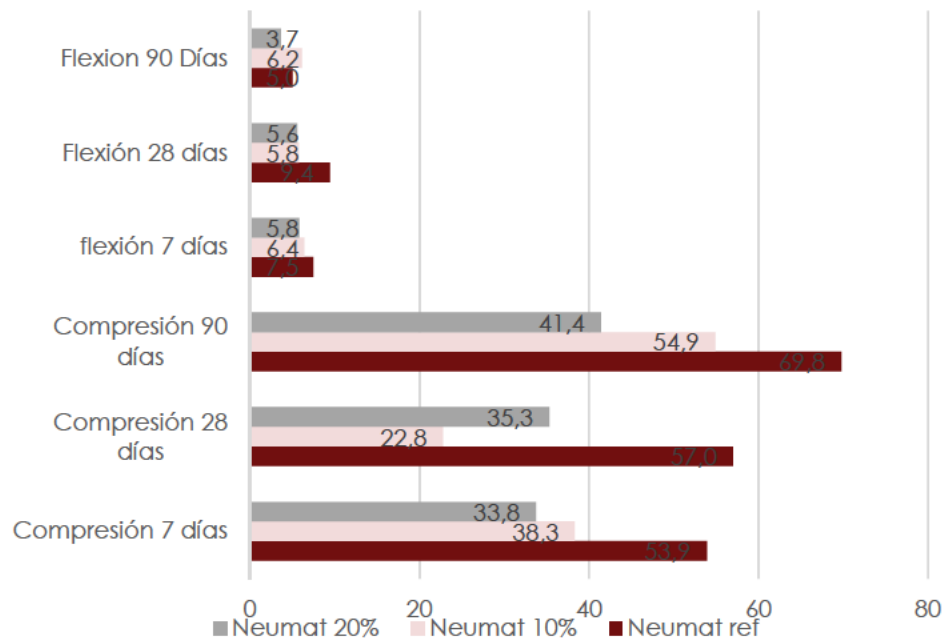


Figura 74 – Resistencia a compresión y flexión de los neumáticos triturados



#### 4B3B. RESIDUOS PLÁSTICOS PROVENIENTES DEL RECICLAJE

Fueron seleccionados dos tipos de árido ambos provenientes del reciclaje de plásticos desechados

##### 4B3B1 POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PEBD)

Con nombre comercial Alfaten 200 Natural, se trata de granzas de PEBD procesado por extrusión simple y proveniente 100% del reciclaje. Índice de fluidez, a 190°C y 2,16kg, (Melt Flow Index), UNE EN ISO 1183, entre 0.2 y 0.7 cm<sup>3</sup>/10min. La **Tabla 58** muestra la granulometría del PEBD y la **Imagen 16** diversas micrografías de los plásticos,

Tabla 58- Granulometría del PEBD

PEBD 100% reciclado			
Tamiz UNE 933-2:2012	Peso retenido	Retenido %	
luz en mm.	g	Parcial	Acumulado
4	208,4	41,4	41,4
2	291,2	57,9	99,3
1	2,3	0,5	99,7
0,5	0,1	0,0	99,7
0,25	0	0,0	99,7
0,125	0	0,0	99,7
0,063	0	0,0	99,7
PASA	1,3	0,3	100,0
MUESTRA	503,3	Módulo granulométrico	5.40

En la **Figura 75** se observa el comportamiento del mortero con plástico Alfaten (**Imagen 15**), (plástico marrón con forma alentejada); cuando su proporción de sustitución es del 10%, la resistencia a compresión se reduce un 17%, y es de un 37% cuando la sustitución es del 20%.



**Imagen 15** – Morteros con Alfaten (Izda.) y Alfafil (Drcha.), dispuestos para las pruebas de resistencia a compresión.

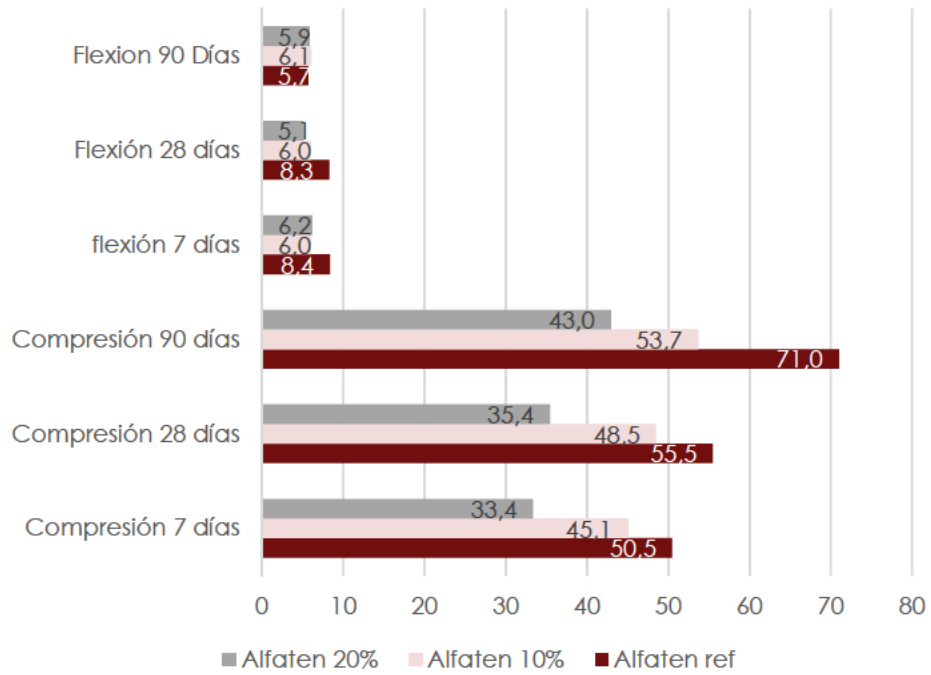


Figura 75 – Resistencia a compresión y flexión del plástico Alfaten

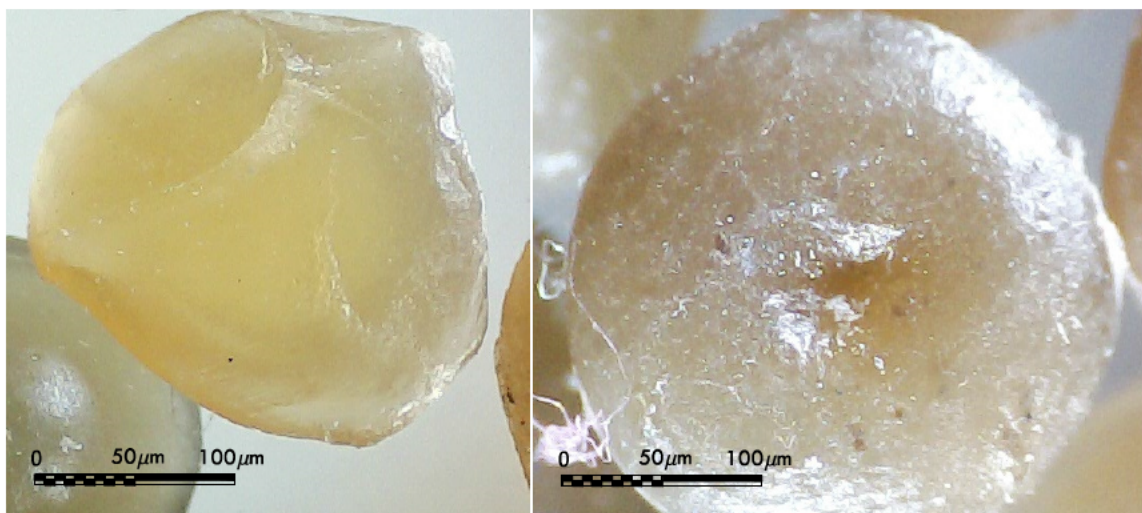
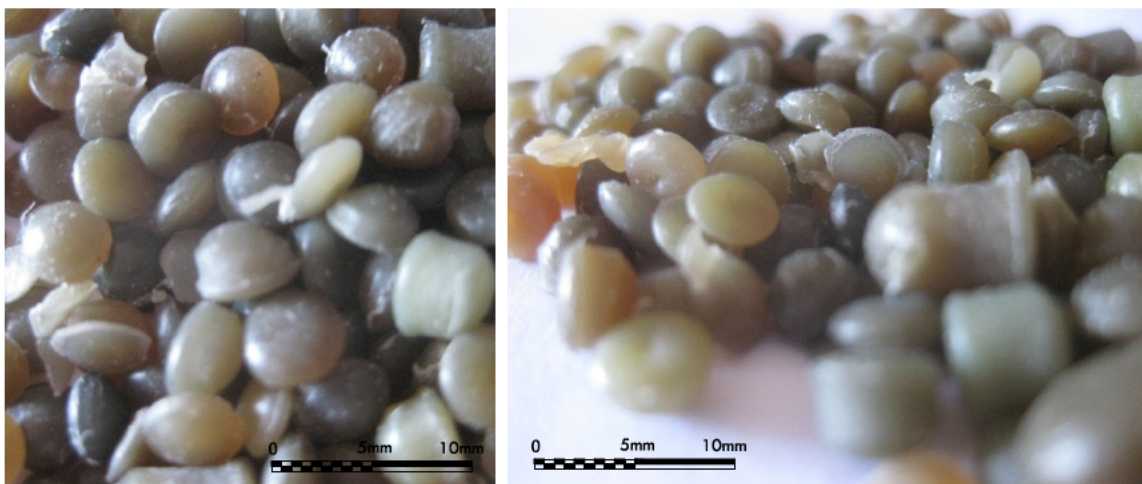
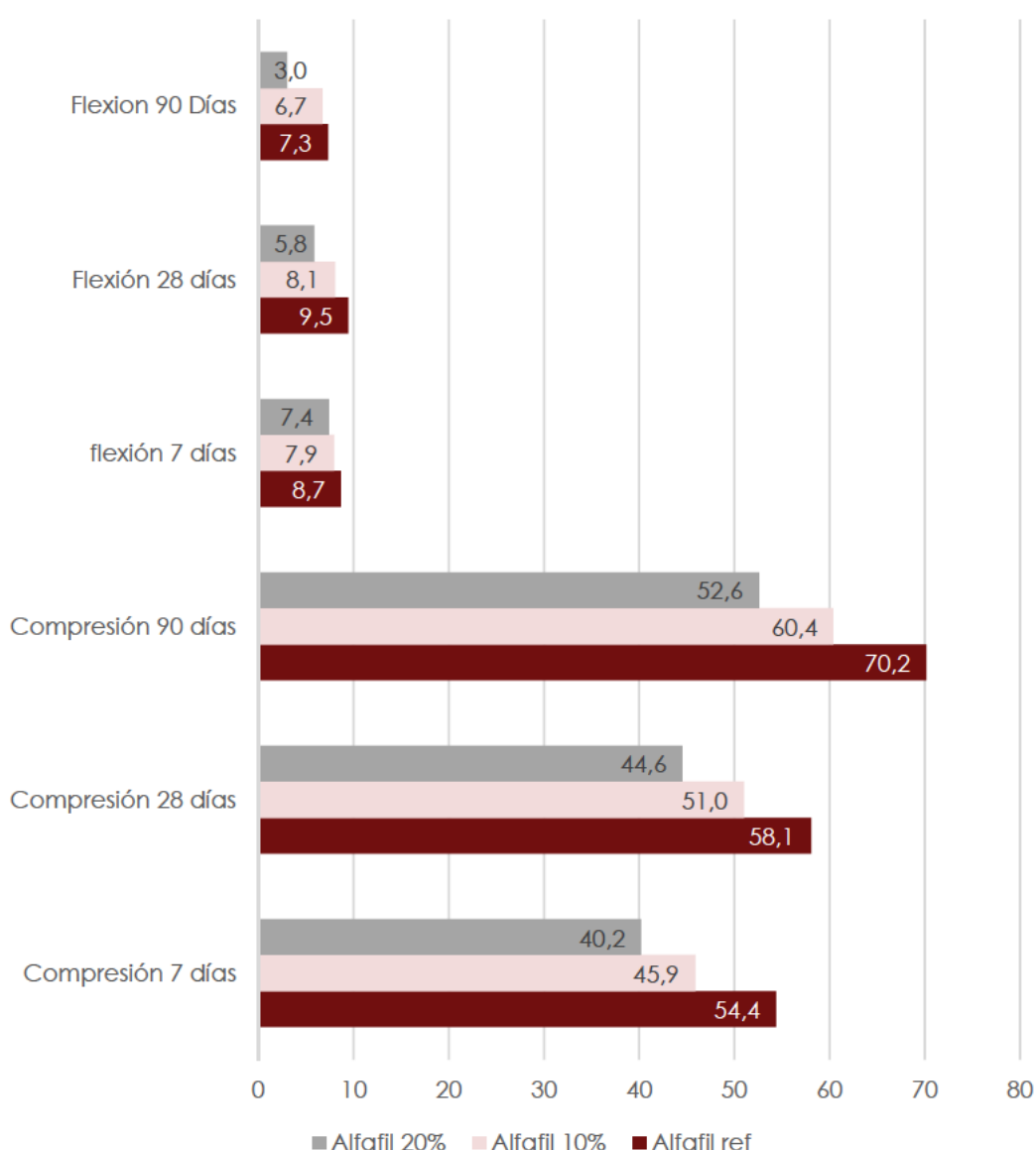


Imagen 16 - Micrografía a diferentes escalas del PEBD

## 4B3B2 POLIPROPILENO (PP)

De nombre comercial Alfafil 240CL Black, en un compound recuperado en un 60% y reforzado con un 40% de Carbonato Cálcico ultrafino moldeado por inyección. En la **Imagen 17** se observan con detalle los gránulos del material. Índice de fluidez, a 230°C y 2,16kg, (Melt Flow Index), UNE EN ISO 1183, entre 3 y 6 g/10min. Densidad 1.2  $\pm 0.02$  g/cm<sup>3</sup>. Módulo de flexión 1700 $\pm 10\%$  MPa y resistencia al impacto Charpy sin entalla, 45-55 KJ/m<sup>2</sup>. La **Tabla 59** muestra la granulometría.

El comportamiento del plástico Alfafil (blanco y negro en forma de pequeños cilindros), se presenta la **Figura 76**. La reducción de resistencia a compresión es de 13% con la sustitución de un 10% del árido tradicional (del volumen) y de un 25% sustituyendo el 20% de los áridos.



**Figura 76** – Resistencia a compresión y flexión del plástico Alfafil



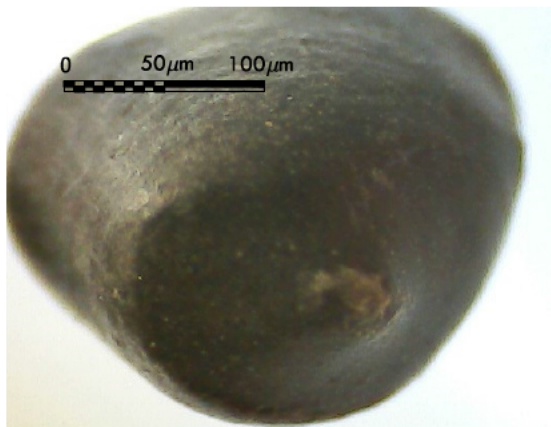
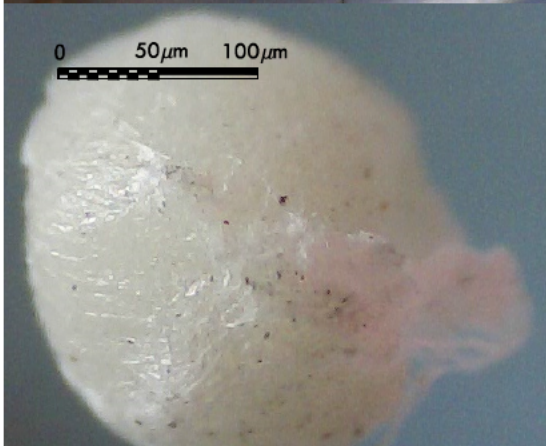
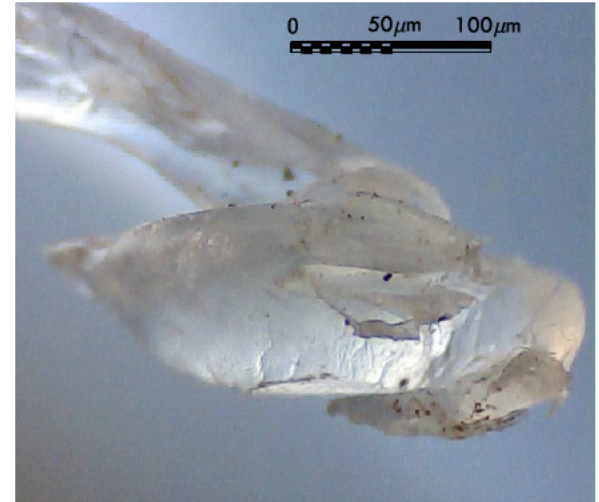
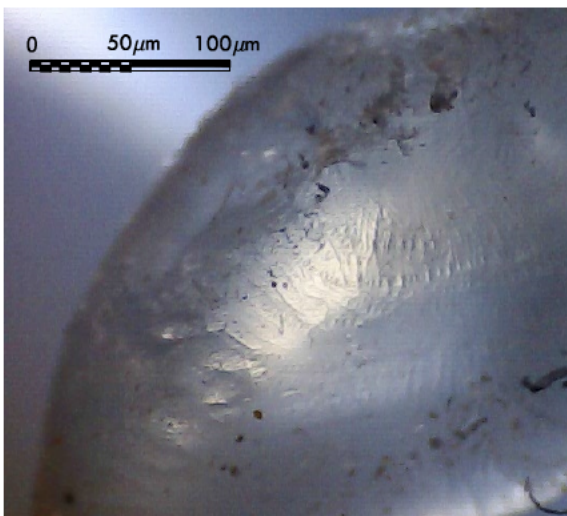
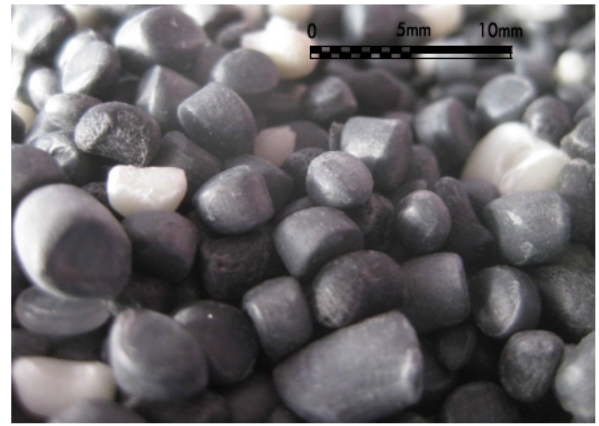
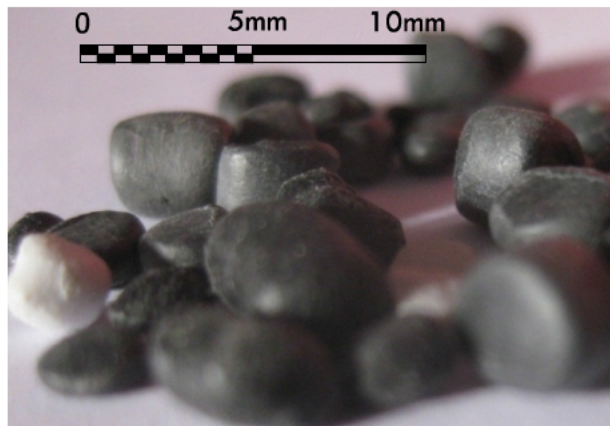


Imagen 17 - Micrografía a diferentes escalas del PP

Tabla 59- Granulometría del PP

Polipropileno			
Tamiz UNE 933-2: luz en mm.	Peso retenido g	Retenido %	
		Parcial	Acumulado
<b>4</b>	348,1	68,9	68,9
<b>2</b>	154,5	30,6	99,5
<b>1</b>	1,2	0,2	99,7
<b>0,5</b>	0	0,0	99,7
<b>0,25</b>	0	0,0	99,7
<b>0,125</b>	0	0,0	99,7
<b>0,063</b>	0	0,0	99,7
PASA	1,3	0,3	100,0
MUESTRA	505,1	Módulo granulométrico	5.67

Tras el estudio del comportamiento de los morteros con 10% y 20% se plantea su uso en una proporción más elevada, de un 29.5%, se fabrican morteros con esta proporción y se someten a pruebas de resistencia, así como porosimetría (PIM) y absorción. En la **Figura 77** y la **Tabla 60** se indican los resultados de los ensayos observándose como en los morteros con plástico se eleva la porosidad un 0.6%. Esta porosidad se agrupa en torno a los poros por debajo de 110nm. En rangos de mayor tamaño de poros, la porosidad de los morteros con plástico es menor que la del mortero de referencia. La resistencia a compresión se ve reducida un 22% y la densidad un 10%.

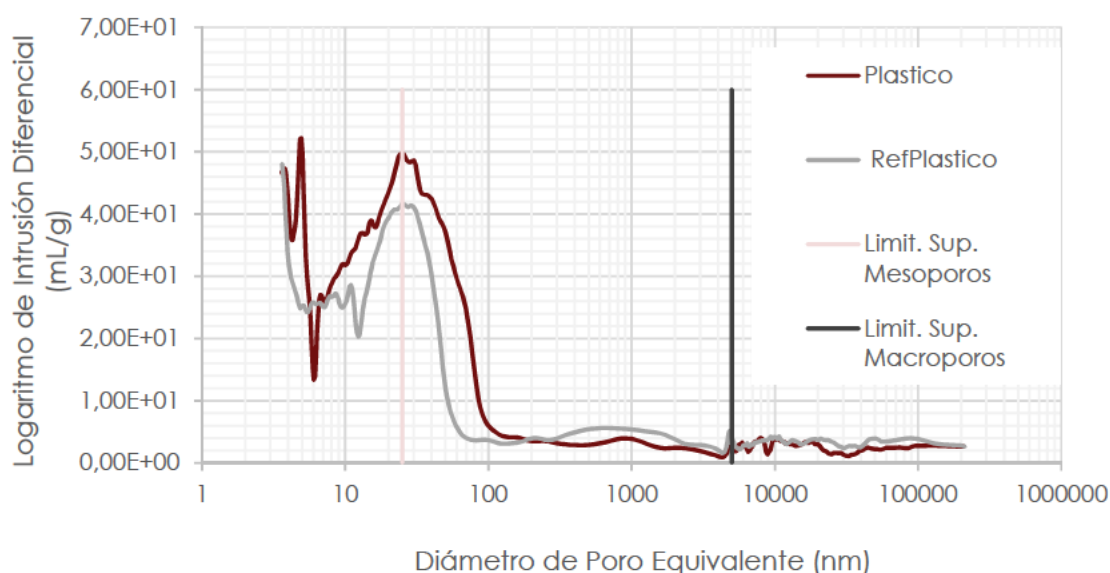


Figura 77 – Distribución de tamaños de poros (PIM)

Tabla 60- Resultados de ensayos de compresión, PIM y densidad.

	Porosidad Total (%)	Tamaño de poro promedio (nm)	Resist. Compresión 28 días (MPa)	Densidad aparente kg/m³	Densidad kg/m³
Ref. Plástico	10,9	0,1447	50,66	2209,7	2105,94
Plástico 29,5%	11,58	0,1418	39,42	1944,5	1897,28



#### 4B3C. CORCHO TRITURADO RECUPERADO

La granulometría del corcho se muestra en la **Tabla 61** en donde se observa la necesidad de su triturado para la fabricación de morteros (También la **Imagen 19** muestra como sus gránulos se asemejan en tamaño a la grava). Tras el triturado se fabricaron morteros a los que se sometió a diversas pruebas. En la **Imagen 18** aparecen los morteros dispuestos para su rotura, el primero es el de referencia, el del centro contiene 10% de sustitución de AT por corcho y el más alejado un 20%, se observa como el que contiene un 20% mostró muchas oquedades y poca uniformidad en la superficie.

En la **Tabla 62**, la **Figura 78** y la **Figura 79** se presentan los resultados de las pruebas de resistencia compresión flexión y PIM. Cuando la sustitución es del 10%, la resistencia se reduce un 57%, y cuando es del 20%, se reduce su resistencia en un 83%.

La porosidad total del mortero con corcho sólo se eleva un 0.33% agrupándose la mayoría de estos poros en torno al rango de tamaño de poro entre 100 y 15000nm y por debajo de los 7nm.



**Imagen 18**– Morteros con corcho dispuestos para las pruebas de resistencia

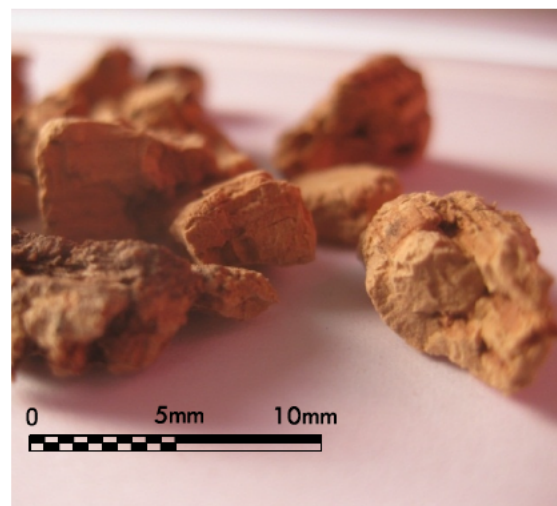
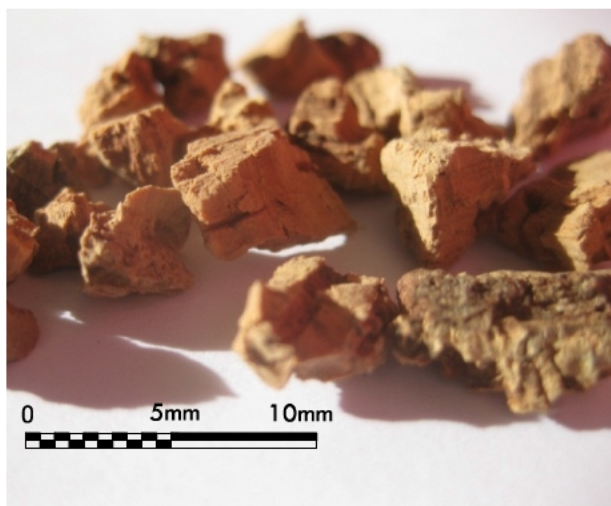




Imagen 19 - Micrografía a diferentes escalas del Corcho

Tabla 61- Granulometría del corcho

Corcho recuperado			
Tamiz UNE 933-2:96	Peso retenido	Retenido %	
luz en mm.	g	Parcial	Acumulado
<b>8</b>	50,6	48,2	48,2
<b>4</b>	53,9	51,3	99,5
<b>2</b>	0,4	0,4	99,9
<b>1</b>	0,04	0,0	99,9
<b>0,5</b>	0,05	0,0	100,0
<b>0,25</b>	0,03	0,0	100,0
<b>0,125</b>	0	0,0	100,0
PASA	0	0,0	100,0
MUESTRA	105,02	Módulo granulométric	1.14

Tabla 62 – Resultados del ensayo PIM, resistencia a compresión y densidad del mortero con 18.5% de corcho

	Porosidad Total (%)	Tamaño de poro promedio (nm)	Resist. Compresión 28 días (MPa)	Densidad aparente kg/m³	Densidad kg/m³
Referencia	13,64	0,1764	55,89	2145,3	2135,35
Corcho 18,5%	13,97	0,1576	36,09	2007	2013,93

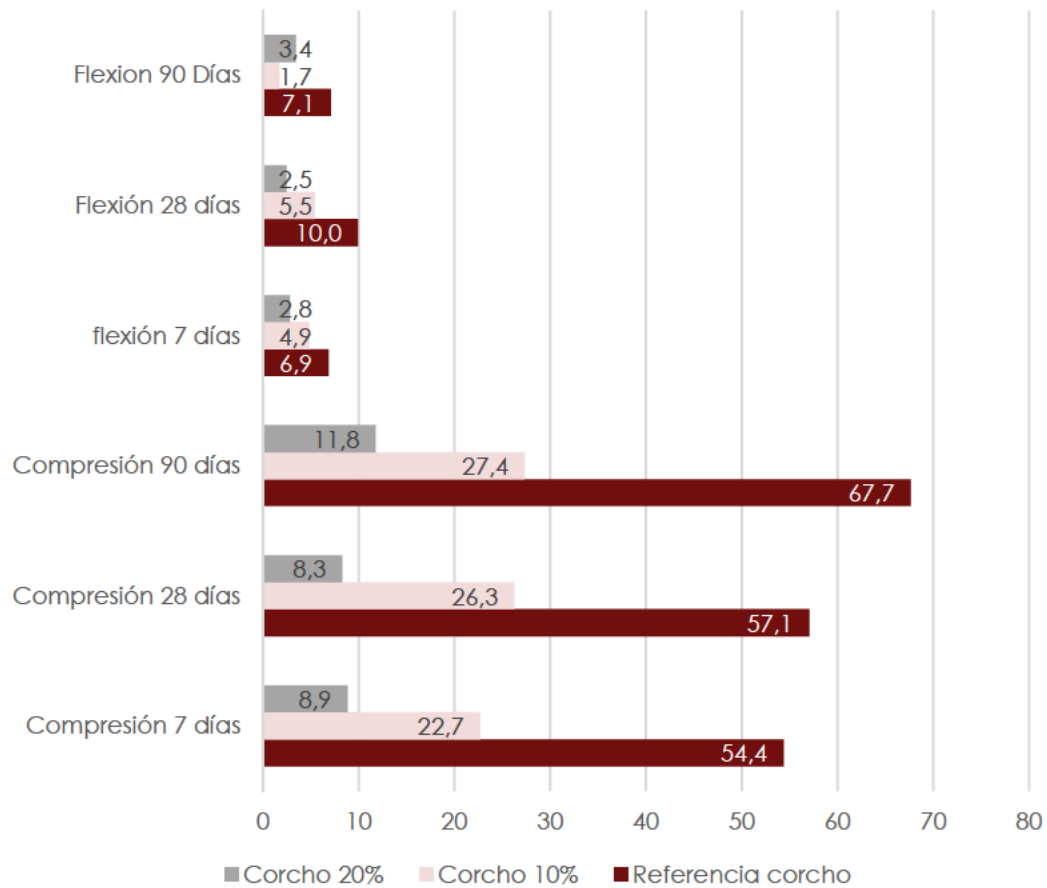


Figura 78 – Resistencia a compresión y flexión del corcho

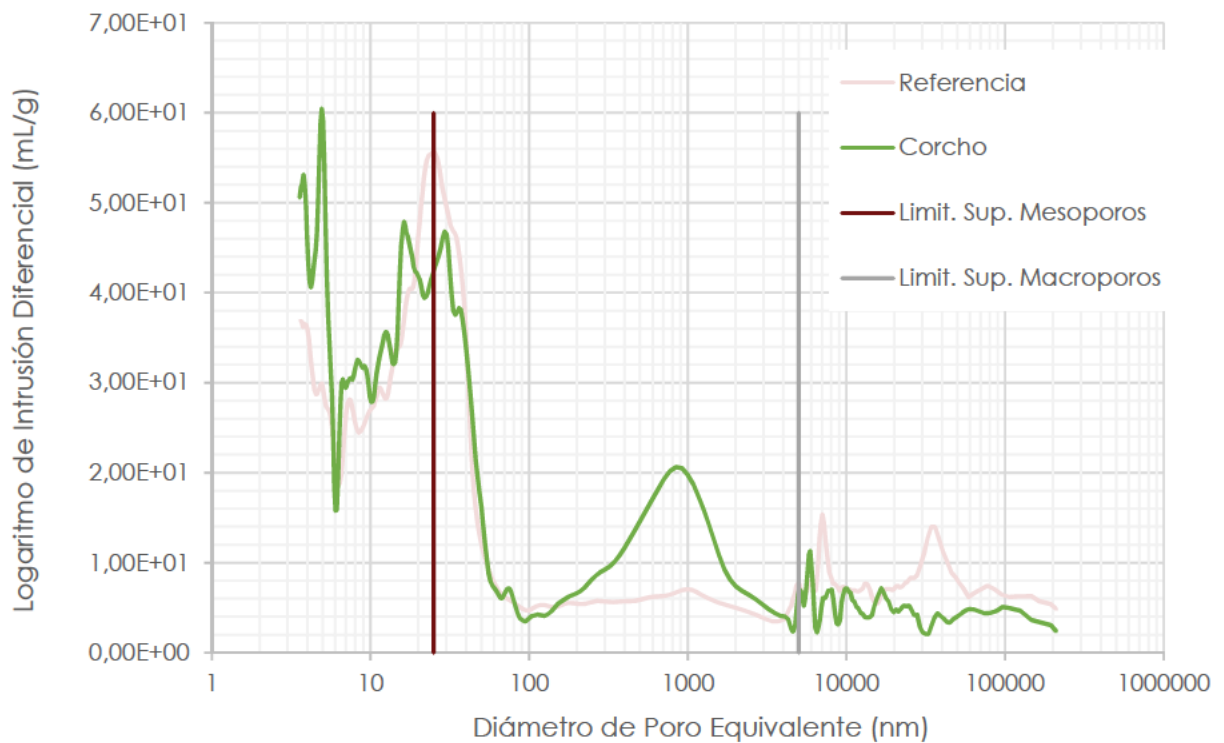


Figura 79– Distribución de tamaños de poros de mortero de referencia y con 18.5% de corcho.

## 4B3D. ANÁLISIS COMPARADOS DE LOS LWA

En la **Figura 80** se grafían las granulometrías de los LWA reciclados. Y en la **Tabla 63** se indican los datos de compresión, flexión y densidad de los morteros fabricados en un primer momento

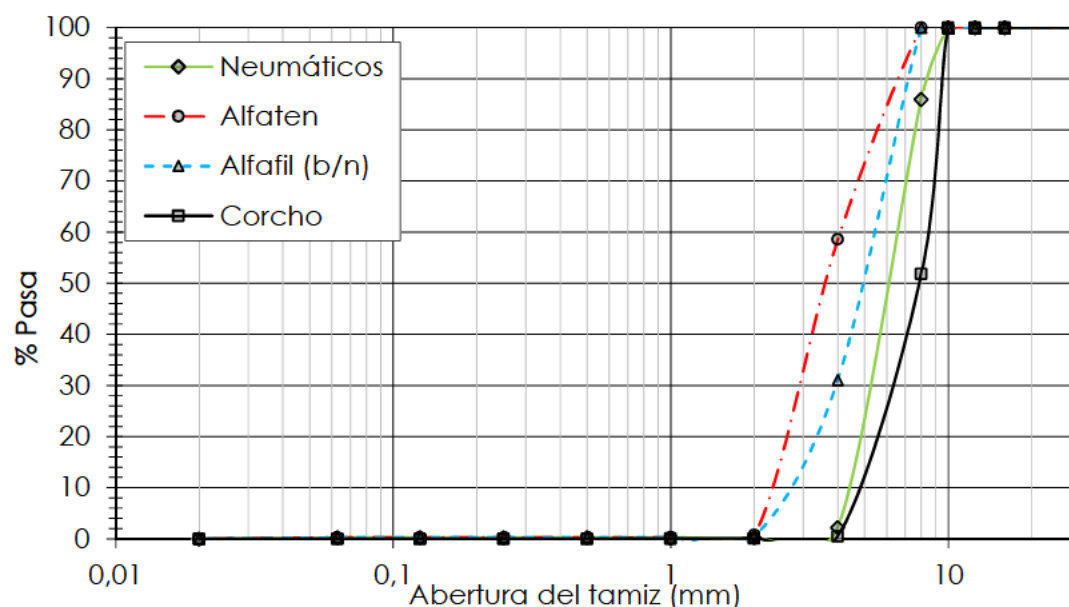


Figura 80- Curvas granulométricas de los áridos reciclados

En la **Figura 81**, se compara el comportamiento mecánico de los áridos reciclados.

El otro aspecto que determina el uso del material será el porcentaje de densidad que consigue reducir el árido reciclado. En la **Figura 82** se reproduce el resultado de los ensayos. Se observa cómo tanto Alfaten como Alfafil y neumáticos reducen en porcentajes del 10% ( $\pm 1\%$ ) al sustituir el 20% del árido tradicional mientras que el corcho triplica este porcentaje.

Al analizar ambas gráficas se concluye que con un solo árido no será posible reducir sustancialmente la densidad y alcanzar la resistencia suficiente para el uso estructural del hormigón. Por esta razón se decide combinar dos áridos, el que menos reduce la resistencia (Alfafil) y el que más reduce la densidad (corcho), en porcentajes de sustitución suficientes para conseguir una densidad por debajo de los 2000kg/m<sup>3</sup> y una resistencia a compresión a 28 días por encima de los 25 MPa.

Comparando los resultados de PIM y capilaridad en la **Tabla 64** se observa que los resultados son dispares, también se presentan en la **Figura 83** gráfica de resultados de PIM y en la **Figura 85** gráfica de resultados de sortividad, ambas con mismo código de colores.

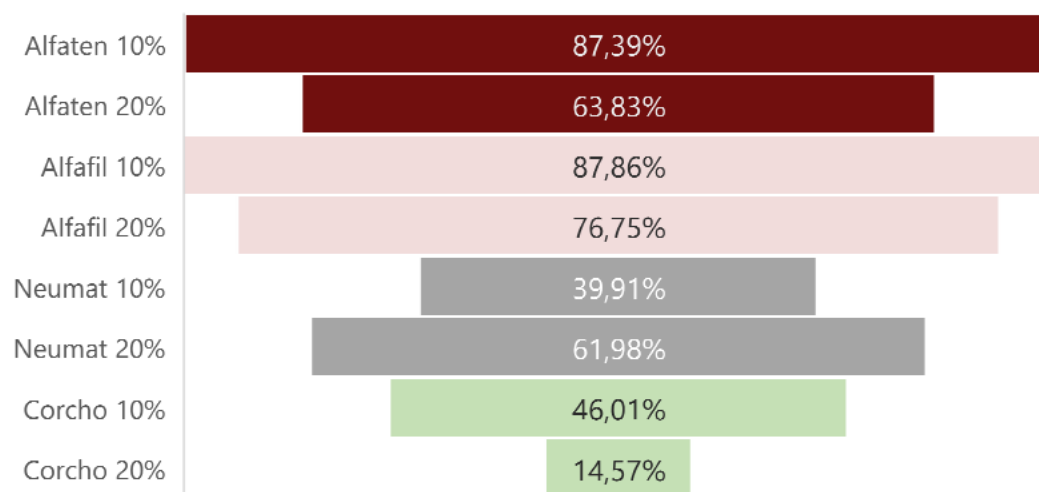
Hay que tener en cuenta que en la prueba PIM sólo es posible introducir una pequeña muestra y dada la heterogeneidad del material, puede haber una concentración desigual de un componente.



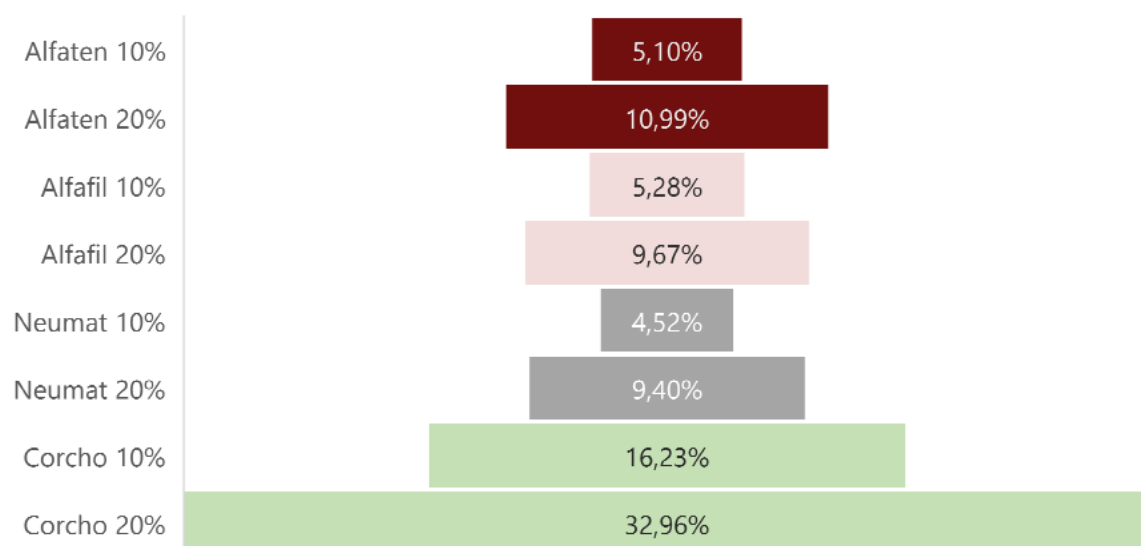
Tabla 63 – Resultados ensayos de morteros con LWA

Mezcla	Resultados ensayos (MPa)						Densidad kg/m <sup>3</sup>
	Compresión 7 días	Compresión 28 días	Compresión 90 días	Flexión 7 días	Flexión 28 días	Flexión 90 Días	
Alfaten ref	50,5	55,5	71,0	8,4	8,3	5,7	2345,6
Alfaten 10%	45,1	48,5	53,7	6,0	6,0	6,1	2225,9
Alfaten 20%	33,4	35,4	43,0	6,2	5,1	5,9	2087,9
Alfafil ref	54,4	58,1	70,2	8,7	9,5	7,3	2348,6
Alfafil 10%	45,9	51,0	60,4	7,9	8,1	6,7	2224,6
Alfafil 20%	40,2	44,6	52,6	7,4	5,8	3,0	2121,4
Neumat ref	53,9	57,0	69,8	7,5	9,4	5,0	2341,1
Neumat 10%	38,3	22,8	54,9	6,4	5,8	6,2	2235,4
Neumat 20%	33,8	35,3	41,4	5,8	5,6	3,7	2121,0
Referencia corcho y arena	54,4	57,1	67,7	6,9	10,0	7,1	2298,0
Corcho 10%	22,7	26,3	27,4	4,9	5,5	1,7	1924,9
Corcho 20%	8,9	8,3	11,8	2,8	2,5	3,4	1540,6
Arena Tipo A	54,4	57,1	67,7	6,9	10,0	7,1	2298,0
Arena Tipo B	64,2	70,3	81,7	8,8	9,5	6,0	2326,1

También en la prueba PIM se observa, en la **Figura 77**, que en la banda de poros de tamaño entre los 50 y los 5000nm, que es la relacionada con la capilaridad, el mortero con 29.5% de plástico tiene una porosidad de valor medio mientras que en la prueba de capilaridad, la porosidad del mortero con plástico es más alta que el resto, al margen de esta diferencia, ambos ensayos (absorción de agua por capilaridad y PIM) coinciden en que el plástico y el corcho absorben más que sus morteros de referencia y que el nanosílice mejora la impermeabilidad del mortero.



**Figura 81**– Porcentajes de la resistencia a compresión de los morteros de referencia, que alcanzan los morteros con LWA reciclados



**Figura 82** – Porcentajes de densidad, que reducen los morteros con LWA, de los morteros de referencia.

**Tabla 64** – Datos de porosidad de ensayos de capilaridad y PIM

	Porosidad $\epsilon_c$ (g/cm <sup>3</sup> )	PIM Porosidad Total (%)
Referencia	0,9683	13,64
Ns 1,5%	0,8738	14,06
Ns 2%	0,9652	11,44
Corcho 18,5%	0,9461	13,97
Ref. Plástico	1,0628	10,9
Plástico 29,5%	1,7487	11,58

Entre las pruebas de durabilidad a las que se someten los morteros están las pruebas de sortividad de las que analizan los resultados en la **Figura 85** y la **Figura 84**, en ambas se aprecia como la sortividad se reduce con el 1.5% de Ns y apenas varía con el 2%. Tanto el corcho como el plástico presentan niveles más altos de capilaridad.

Las proporciones que se plantean para la fabricación del prototipo son un porcentaje de sustitución del 18% del volumen de áridos de tradicionales por cocho, y del 30% de plástico Alfafil.

La **Figura 86** presenta el cálculo de estos porcentajes sobre los datos de resistencia obtenidos en esta fase suponiendo que la tendencia es exponencial al elevar la cantidad de sustitución. La **Figura 87** presenta los datos análogos, sobre los porcentajes de pérdida de densidad.

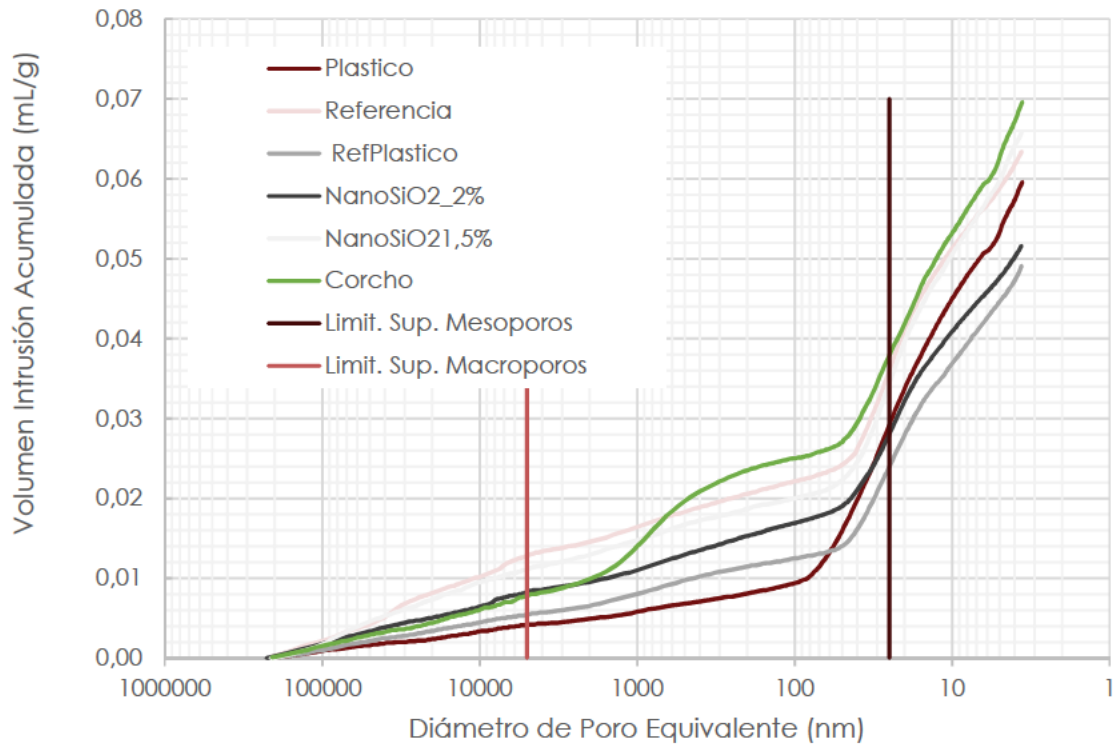


Figura 83 - Distribución dimensional de los poros de las muestras de morteros (PIM)

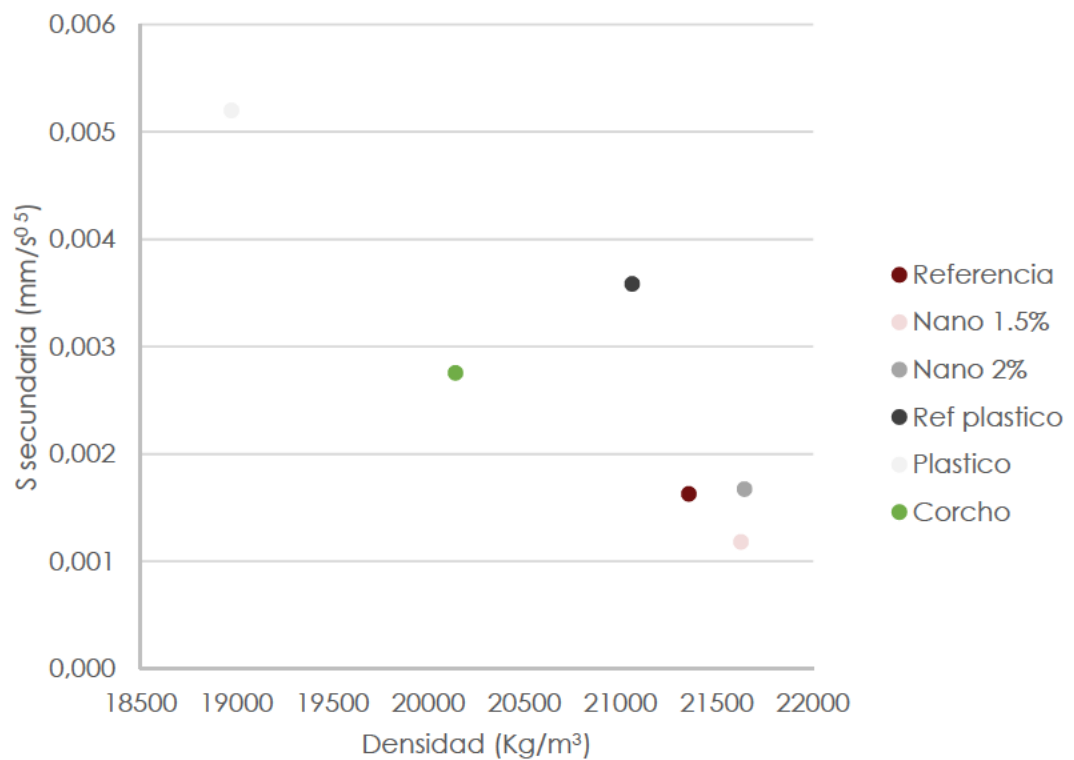


Figura 84 – Sortividad secundaria Vs. Densidad

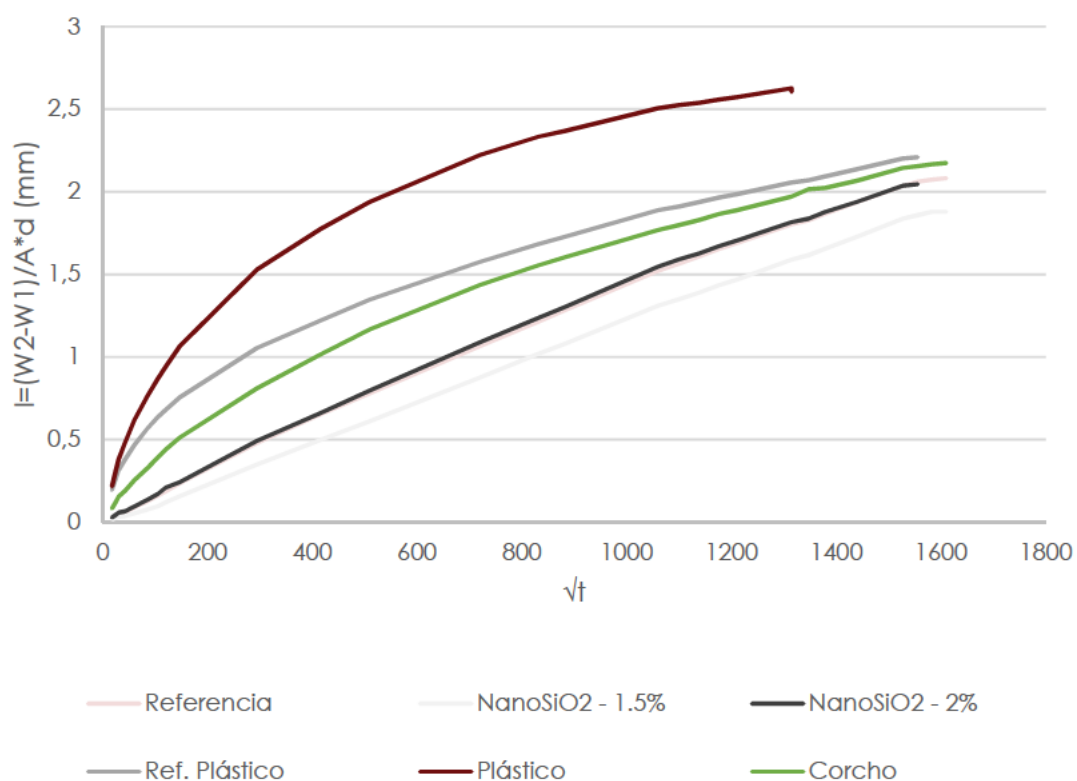


Figura 85 – Absorción de agua Vs. Raíz del tiempo (Sortividad)

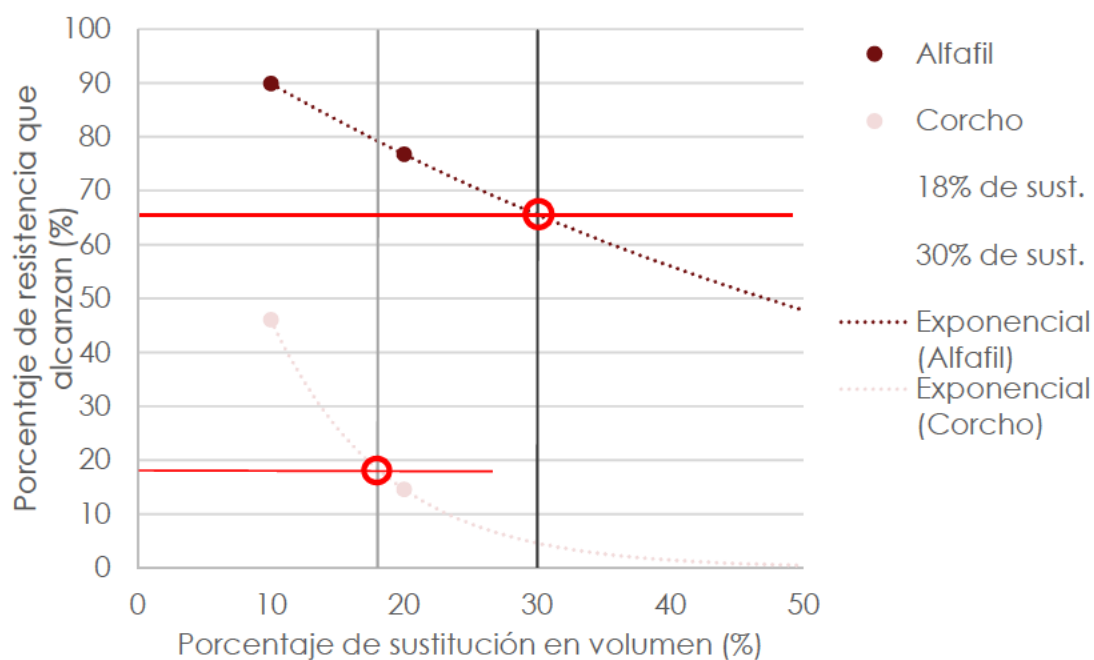


Figura 86 – Estimación de resistencia a compresión para los porcentajes de sustitución estimados

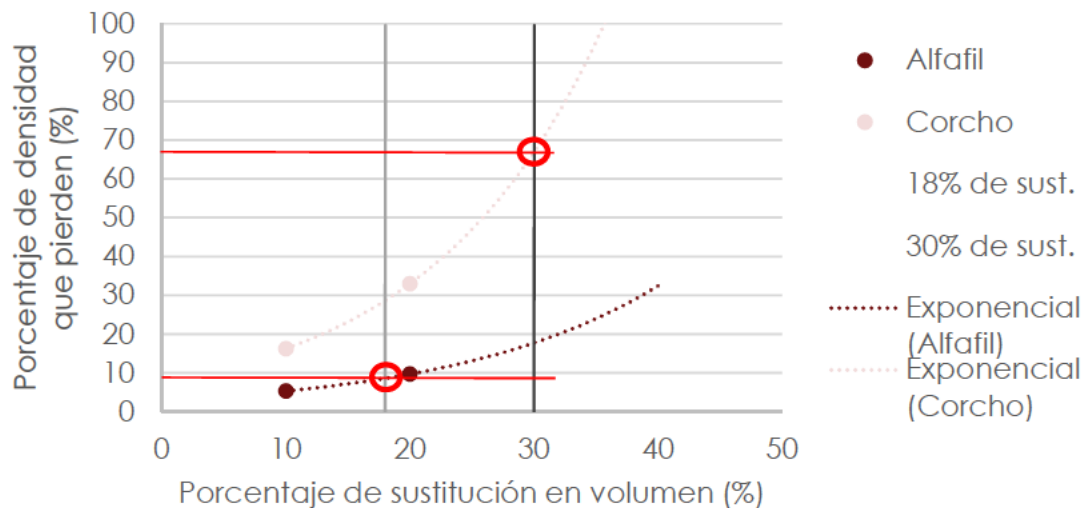


Figura 87– Estimación de densidad para los porcentajes de sustitución estimados

Una vez seleccionados los áridos y sus proporciones, se fabricaron morteros con los áridos para analizar su comportamiento.

En la **Figura 88** se muestran los resultados de compresión y flexión. Se observa como en este caso el Ns no supone la mejora que mostró en los morteros anteriores, esto puede ser debido al tipo de arena.

Los áridos en las proporciones indicadas reducen, en el caso del corcho, un 32.4% de la resistencia del mortero de referencia y el plástico un 22.2%.

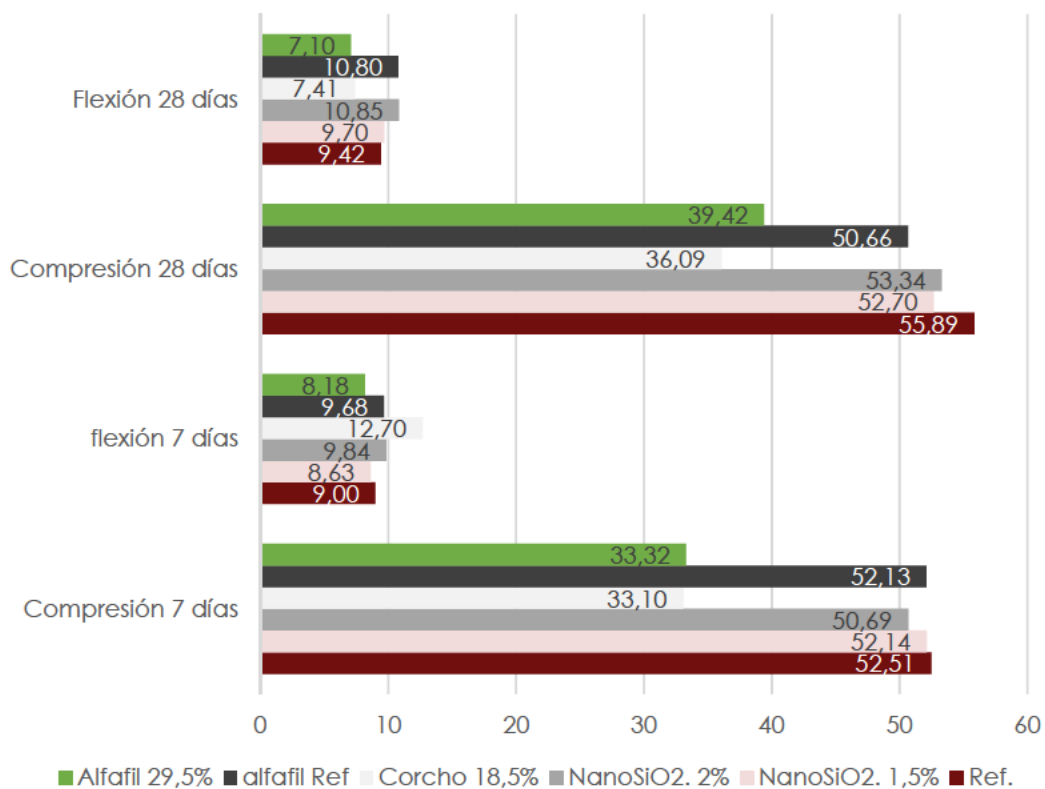


Figura 88 – Resultados resistencia mecánica mortero durabilidad

**4B3E. ARENA CALIZA TIPO A.**

Esta arena fue utilizada en las pruebas iniciales durante el proceso de hormigones para caracterización de los LWA y de ajuste de la dosificación. Cuenta con la designación AF-T 0/4-C, lo que indica que es un árido fino, con tamaño máximo de árido 4mm y mínimo 0mm y de naturaleza caliza,

La **Tabla 65** y la **Figura 90** muestran la granulometría de la arena. la **Figura 89** contiene los resultados de los ensayos de resistencia a compresión y flexión de los morteros con arena tipo A.

La densidad aparente de las partículas es de  $2.75\text{mg/m}^3$ , contenido en finos 10.9% y absorción de agua: 2.9%.

**Tabla 65-** Granulometría de la arena Tipo A

Arena caliza tipo A.				
Tamiz UNE 933-2:2012	Peso retenido	Retenido %		Pasa acumulado
luz en mm.	g	Parcial	Acumulado	%
<b>4</b>	75,3	15,1	15,1	84,9
<b>2</b>	142,7	28,5		56,4
<b>1</b>	73,5	14,7	58,3	41,7
<b>0,5</b>	40,6	8,1	66,4	33,6
<b>0,25</b>	38,5	7,7	74,1	25,9
<b>0,125</b>	45,8	9,2	83,3	16,7
<b>0,063</b>	29,4	5,9	89,2	10,8
PASA	54,2	10,8	100,0	0,0
MUESTRA	500	Módulo granulométrico		3,41

**4B3F. ARENA CALIZA TIPO B.**

Esta arena fue empleada en la producción de los hormigones definitivos. La **Tabla 66** y la **Figura 90** muestran la granulometría de la arena, la **Imagen 20** micrografías a distinta escala y la **Figura 89** los resultados de los ensayos de resistencia. La designación de esta arena es idéntica al tipo A; AF-T 0/4-C.

La densidad aparente de las partículas es de  $2.86\text{mg/m}^3$ , contenido en finos 18% y absorción de agua: 3.5%. En la **Figura 89** se muestra el comportamiento mecánico, a compresión y flexión, de ambos áridos.

El comportamiento de la arena tipo B justifica su uso frente al tipo A pasando, en las fases finales a ser el árido fino tradicional utilizado.



Tabla 66 - Granulometría de la arena Tipo B

Arena caliza tipo B				
Tamiz UNE 933-2:2012	Peso retenido	Retenido %		Pasa acumulado
luz en mm.	g	Parcial	Acumulado	%
4	23,95	4,1	4,1	95,9
2	178,3	30,2	34,2	65,8
1	133,3	22,5	56,8	43,2
0,5	81,35	13,8	70,5	29,5
0,25	50,5	8,5	79,1	20,9
0,125	33,75	5,7	84,8	15,2
0,063	20,55	3,5	88,3	11,7
PASA	69,45	11,7	100,0	0,0
MUESTRA	591,15	Módulo granulométrico		3,29

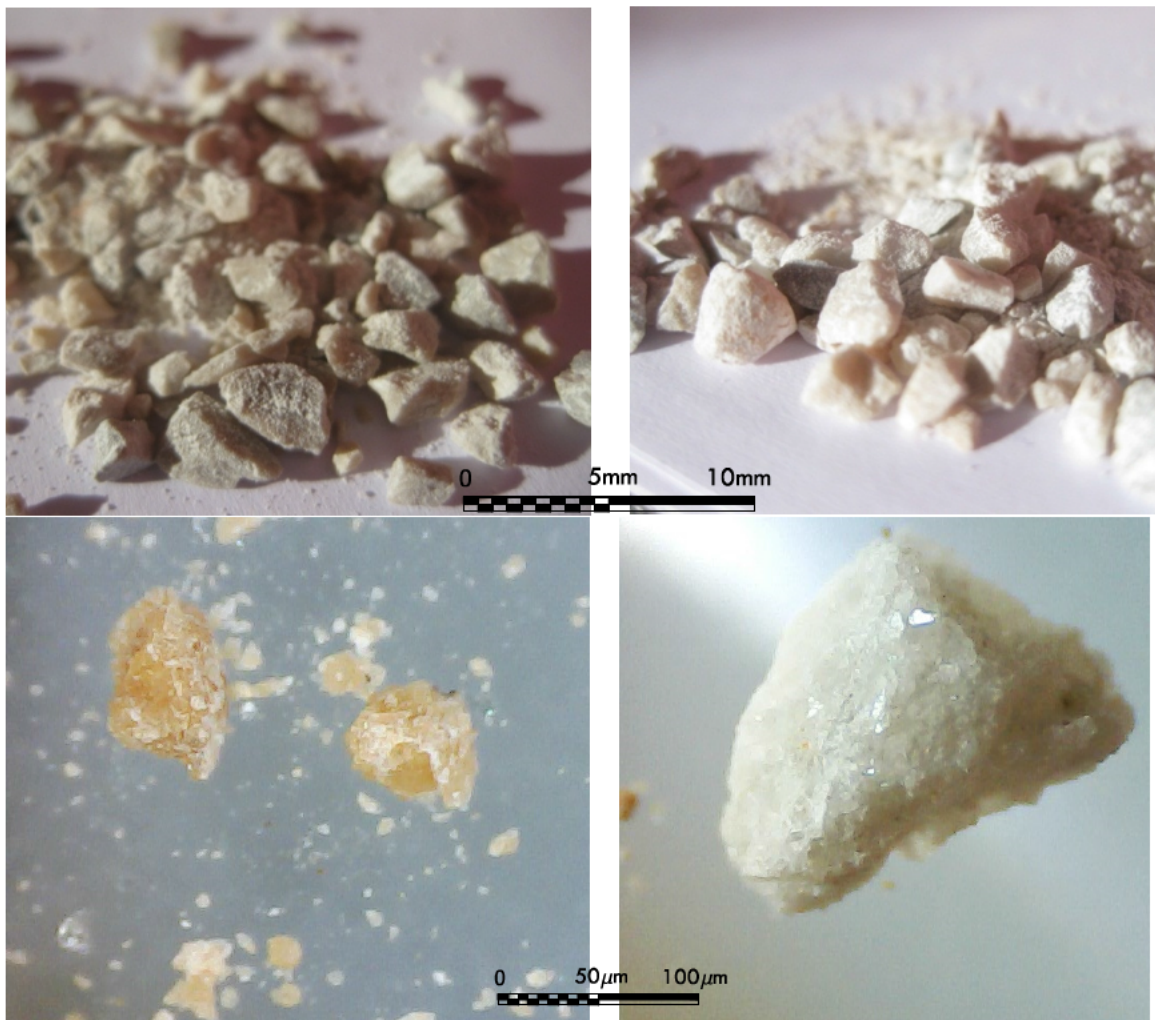
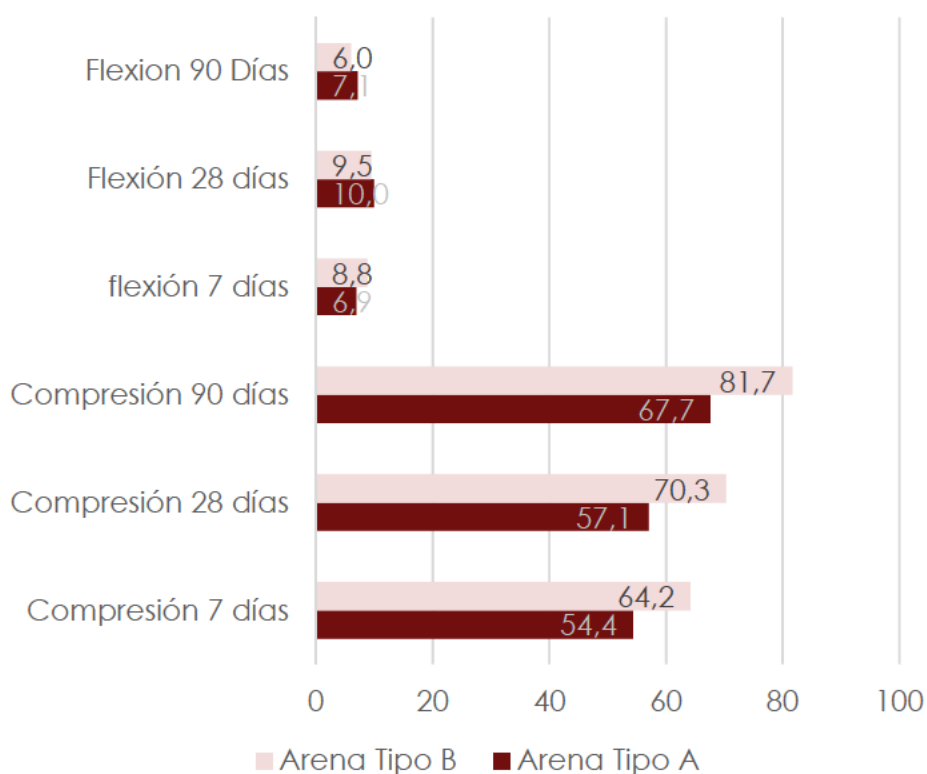


Imagen 20 - Micrografía a diferentes escalas de la arena Tipo B



**Figura 89** – Resistencia a compresión y flexión de los dos tipos de arena

#### 4B3G. GRAVA

La grava utilizada durante todo el estudio recibe la designación de AG-T-6/12-C, (árido grueso, tamiz mínimo por el que pasa 6mm y máximo 12mm con naturaleza caliza). Densidad aparente de las partículas 2,6-2,8mg/m<sup>3</sup>, absorción de agua: >5%.

La **Tabla 67** y la **Figura 90** muestran la granulometría de la grava y la **Imagen 21** distintas microfotografías a diferentes escalas.

**Tabla 67** - Granulometría de la grava

Grava				
Tamiz UNE 933-2:96	Peso retenido	Retenido %	Pasa acumulado	
luz en mm.	g	Parcial	Acumulado	%
<b>16</b>	0	0,0	0,00	100,0
<b>12,5</b>	424,16	23,0	23,00	77,0
<b>11,2</b>	553,25	30,0	53,00	47,0
<b>8</b>	796,68	43,2	96,20	3,8
<b>6,3</b>	53,48	2,90	99,10	0,9
<b>4</b>	0,00	0,00	99,10	0,9
<b>2</b>	0,00	0,00	99,10	0,9
<b>1</b>	0,00	0,00	99,10	0,9
PASA	0,05	0,90	100,00	0,7

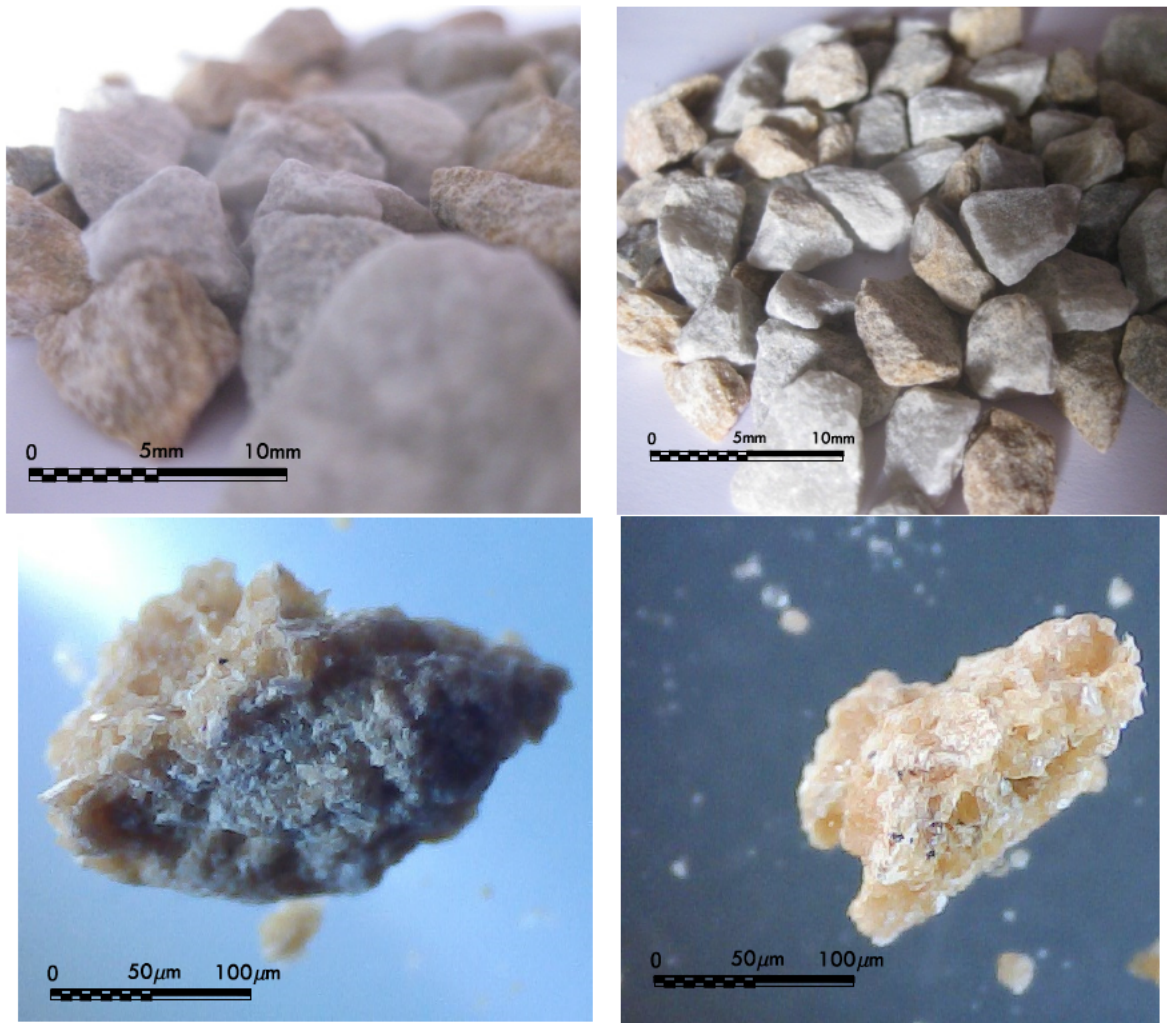


Imagen 21- Micrografía a diferentes escalas de la grava

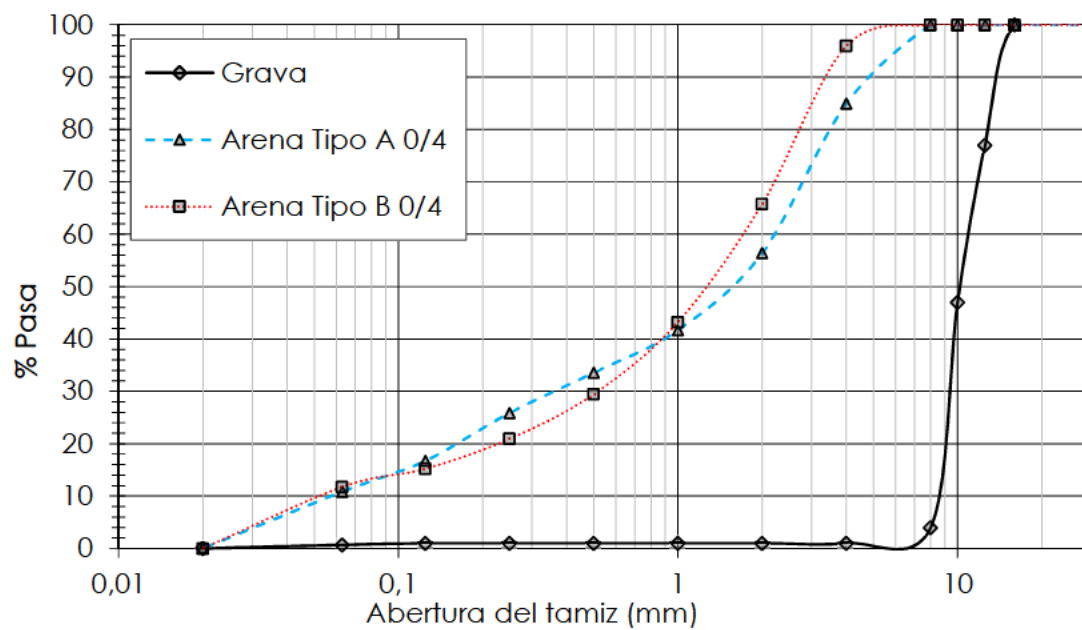


Figura 90- Granulometrías de los áridos no ligeros



#### 4B4. FIBRAS

Tras la primera fase de fabricación de hormigones se seleccionaron dos tipos de fibras; las de polivinilo y las de esparto, para ser ensayadas en morteros con el fin de conocer su aptitud en la inclusión en el prototipo.

Las fibras no se podrán direccionar ni disponer más de que de forma aleatoria dado que las pruebas industriales se harán en planta de hormigón por medios tradicionales de fabricación "in situ" y esto impide el tratamiento de la disposición de las fibras.

##### 4B4A. FIBRAS DE ESPARTO

Para utilizar las fibras se le somete antes al tratamiento antes descrito de hornificación. En la **Imagen 22**, se observan diferentes momentos del tratamiento. La **Imagen 23** muestra micrografías de las fibras.



**Imagen 22** - Imagen de las fibras de esparto sometidas a hornificación

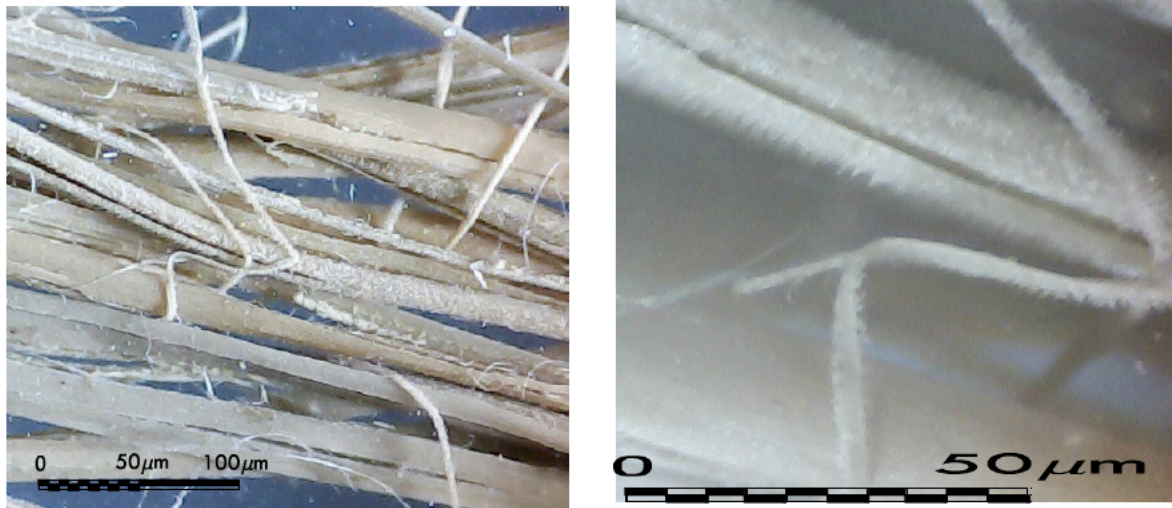


Imagen 23 - Micrografía a diferentes escalas de las fibras de esparto

#### 4B4B. FIBRAS DE POLIVINILO

En la **Figura 91** y la **Tabla 68** se observa como las fibras analizadas suponen, pérdidas en la resistencia a compresión. Sólo la dosificación más alta de la fibra de polivinilo, a 90 días de curación, supone una mejora en la flexión. El resto de los casos reduce la resistencia.

A esto hay que añadir que el uso de fibras dificulta notablemente la trabajabilidad del hormigón, por lo que se concluye que, para los objetivos marcados, el uso de fibras es contraproducente y no se añadirán a las dosificaciones definitivas. En la **Imagen 24** se muestran micrografías de las fibras.

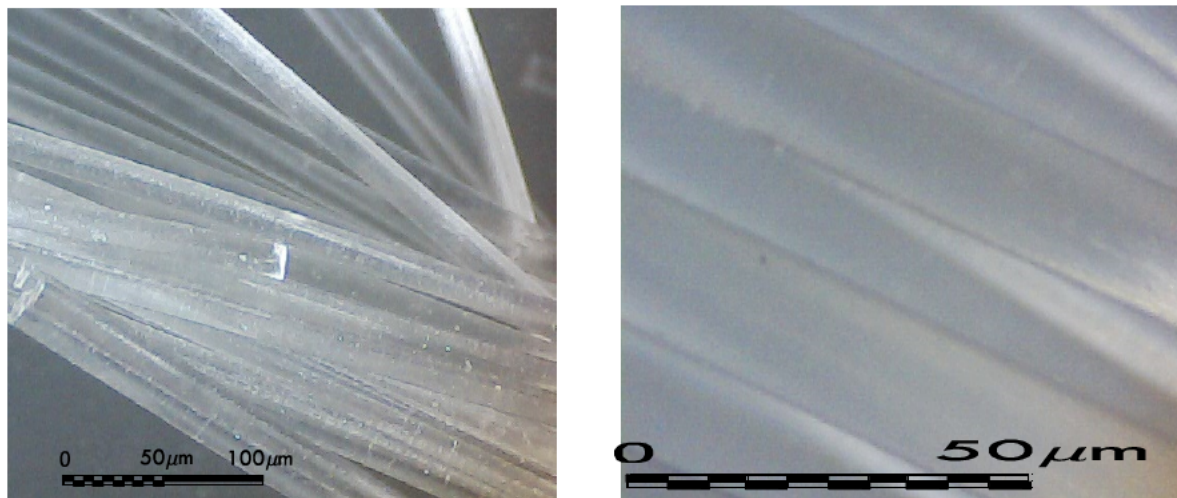


Imagen 24 - Micrografía a diferentes escalas de polivinilo

Tabla 68 – Resultados ensayos de morteros con fibras

Mezcla	Resultados ensayos (MPa)					
	Compresión 7 días	Compresión 28 días	Compresión 90 días	Flexión 7 días	Flexión 28 días	Flexión 90 Días
Referencia	54,4	57,1	67,7	6,9	10,0	7,1
MF400 2%	54,5	53,7	67,2	9,0	8,2	6,2
MF400 4%	40,6	43,6	55,2	7,1	9,2	13,9
Esparto 2%	48,7	52,9	64,2	8,6	9,4	5,3

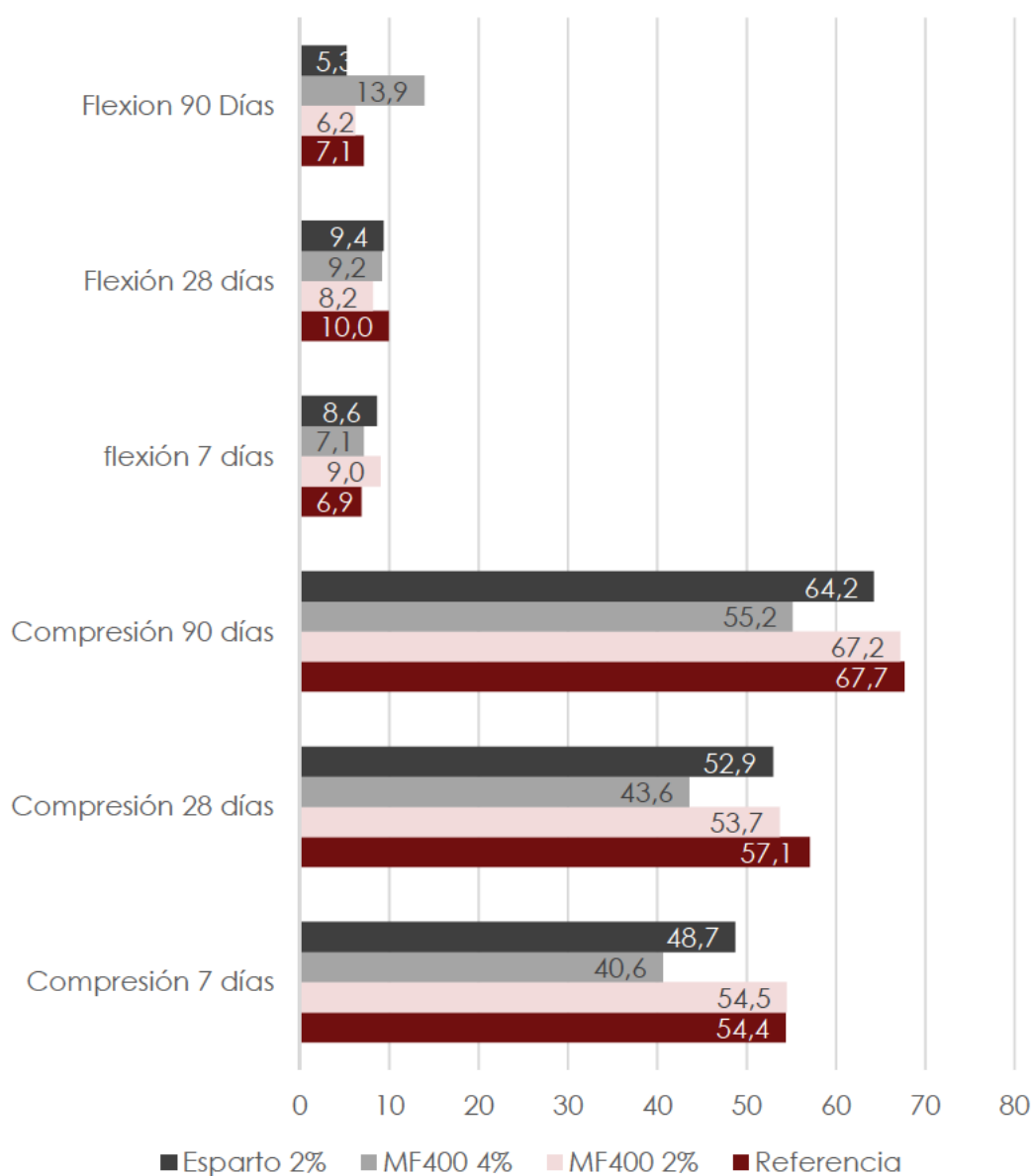


Figura 91 – Resistencia a compresión y flexión de las fibras analizadas.



#### 4C. PROCEDIMIENTOS

##### 4C1. RESISTENCIA MECÁNICA

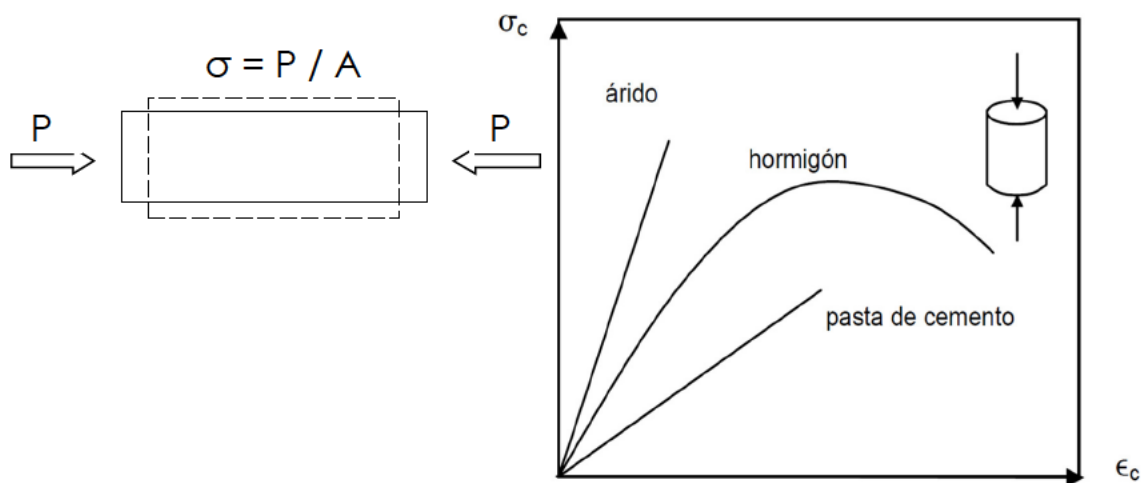
##### 4C1A. COMPRESIÓN

La compresión se define como el esfuerzo a que está sometido un cuerpo por la acción de dos fuerzas opuestas que tienden a disminuir su volumen.

Por separado, el árido y la pasta de cemento tienen un comportamiento que se puede aproximar al lineal, esto no sucede con el hormigón, como se puede observar en la **Figura 92**. Esta no linealidad es debida fundamentalmente a microgrietas que aparecen en la interfase roca-pasta de cemento. [147]

El esfuerzo, fatiga, intensidad o tensión es la fuerza por unidad de superficie. En un prisma mecánico el esfuerzo de compresión es la fuerza resultante que actúa sobre una determinada sección transversal al eje baricéntrico de dicho prisma, lo que tiene el efecto de acortar la pieza en la dirección de eje baricéntrico.

La EHE-08 (2009), define la resistencia a compresión como un convenio que permite asociar, a cada unidad de producto o amasada de hormigón, un valor relacionado con el concepto físico de resistencia del material que, aún distinto de aquel, es lo suficientemente representativo para el fin práctico de esta instrucción. Para hormigones estructurales, la resistencia de proyecto no será inferior a 20 N/mm<sup>2</sup> en hormigones en masa, ni a 25 N/mm<sup>2</sup> (MPa) en hormigones armados o pretensados.



**Figura 92** - Esquema esfuerzo de compresión (izquierda) y diagrama tensión-deformación (derecha) [147]

El ensayo que se realiza para medir esta resistencia suele, en los estudios científicos, estar regido por la norma ASTM-C39 Método de Ensayo Estándar para esfuerzo de compresión en especímenes cilíndricos de hormigón. Ver **Imagen 25** e **Imagen 26**.

Es un ensayo con más de 80 años de antigüedad para probetas de hormigón cilíndricas a partir de hormigón fresco con peso unitario mayor de 800 Kg/m<sup>3</sup>. Consiste

en aplicar una carga axial de compresión al cilindro hasta que este falla, el esfuerzo de compresión del espécimen es calculado dividiendo la carga máxima obtenida durante el ensayo por el área de la sección transversal del espécimen.

Hay que tener en cuenta que los valores obtenidos dependerán del tamaño y forma de la muestra, envoltura, procedimiento de mezclado, encofrado, edad, temperatura y humedad durante el curado, etc.

Respecto a la máquina de ensayo, debe tener suficiente capacidad y ser capaz de proporcionar la cantidad de carga prescrita y aplicarla de forma continua y sin saltos.

La carga de ensayo indicada por la máquina y la carga aplicada calculada de las lecturas del dispositivo de verificación, deberán ser registradas en cada punto de la prueba. Se debe calcular el error, E, y el porcentaje de error, Ep, para cada punto de esa información como sigue:

$$E = A - B$$

$$E_p = 100 (A - B) / B$$

dónde:

A = carga, KN indicado por la máquina que se está verificando.

B = carga aplicada, KN determinado por el dispositivo de calibración



**Imagen 25** - Ensayo de resistencia a compresión de testigo de hormigón

La máquina de ensayo debe estar equipada con dos bloques de carga de acero, con caras endurecidas, una de las cuales es un bloque con asiento esférico que apoya en la parte superior del espécimen, y la otra es un bloque sólido en el cual

descansa el espécimen. Las caras de carga de los bloques deben tener una dimensión mínima al menos 3% mayor que el diámetro del espécimen a ser ensayado. El bloque de carga inferior se especifica con el propósito de proporcionar una superficie lisa endurecida para mantener la condición superficial especificada. Si la máquina de ensayo está diseñada de manera que ella misma se nivele y estar lista para mantenerla en la condición superficial especificada, no se requiere la placa inferior.



Imagen 26 - Ensayo de resistencia a compresión de testigo de hormigón en el momento de la rotura

#### 4C1B. TRACCIÓN

Se denomina tracción al esfuerzo a que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo. La EHE-08 (2009), española permite que el valor de la resistencia a tracción se estime, a falta de ensayos, mediante:

$$f_{ct,m} = 0,30 f_{ck}^{2/3} \quad \text{para } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$f_{ct,m} = 0,58 f_{ck}^{1/2} \quad \text{para } f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$$

Donde  $f_{ck}$  es la resistencia característica a compresión y  $f_{ct,m}$  la resistencia media a tracción.

El hormigón es un material que como todas los pétreos, tiene muy baja resistencia a tracción y por eso no afecta en el cálculo estructural pero sí es determinante a la hora de la resistencia a cortante o ante la fisuración. Hay tres

maneras de obtener esta resistencia en una probeta que se esquematizan en la **Figura 93**:



**Figura 93**- Esquemas métodos obtención resistencia a tracción de una probeta

La tercera forma sería la más correcta pero su realización es muy complicada sin alterar los resultados. La más extendida, y que se realiza en la mayoría de los artículos examinados, es la segunda. Normalmente regida por la norma ASTM C 496 "Método de Ensayo Estándar para esfuerzo de tracción en especímenes cilíndricos de hormigón". Es el ensayo recomendado por la EHE-08 (2009), el Eurocódigo y la ACI

Es el llamado "ensayo brasileño" y consiste en aplicar una carga externa de compresión en una de las caras de la muestra cilíndrica o cúbica, mientras que el extremo opuesto a la carga permanece apoyado como se muestra en la **Imagen 27**. Las reacciones de la carga y del apoyo forman dos fuerzas concentradas diametralmente opuestas que producen una distribución uniforme de tracciones transversales a lo largo del eje de carga, causando en consecuencia una rotura a tracción de la muestra. Dicha tracción hallada se considera una propiedad del material.



**Imagen 27** - Aparato de ensayos para obtención de resistencia a tracción en probetas de hormigón

La máxima carga sostenida por el espécimen es dividida por un factor geométrico apropiado para obtener el esfuerzo de tracción.

Cálculo el esfuerzo de tensión por partidura del espécimen:



$$T = 2P / \pi ld \quad (1)$$

donde:

T = esfuerzo de tensión por partidura, Kpa

P = máxima carga aplicada, indicada por la máquina de ensayo,

KNl= longitud, m

d = diámetro, m

El informe debe contener al menos:

Número de identificación. Diámetro y longitud, m. Carga máxima, KN. Esfuerzo de tensión por partidura calculado con aproximación de 35 Kpa. Proporción estimada de árido grueso fracturado durante el ensayo. Edad del espécimen. Historia de curado. Defectos en el espécimen. Tipo de fractura y tipo de espécimen.

#### 4C1C. MÓDULO DE ELASTICIDAD

También denominado módulo elástico, módulo de Young (módulo elástico longitudinal) o módulo de deformación (ya que el hormigón no es un cuerpo elástico), es un tipo de constante elástica que indica la relación entre tensión (aplicado en un ensayo de tracción) y deformación.

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

Equivale a la tangente en cada punto de la zona elástica en la gráfica tensión-deformación ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) obtenida del ensayo de tracción.

En muchos casos el módulo de elasticidad es constante durante la zona elástica del material, indicando un comportamiento lineal del mismo (ley de Hooke).

El módulo de elasticidad indica la rigidez de un material: cuanto más rígido es un material mayor es su módulo de elasticidad.

Para llegar al módulo de elasticidad la generalidad de los estudios obtienen los datos a través del ensayo llamado "de doble punzonamiento" y siguen la norma **ASTM C 469** "Método de Ensayo Estándar para módulo de elasticidad estático y Coeficiente de Poisson del hormigón en compresión"

El ensayo de doble punzonamiento es un ensayo diseñado inicialmente para determinar la resistencia a la tracción indirecta del NC como alternativa al ensayo brasileño. Este ensayo fue presentado por Chen (1974) a principios de la década de los 70 y desde entonces se han realizado intensas investigaciones. En el ensayo de doble punzonamiento. Se dispone una probeta cilíndrica de hormigón de diámetro y altura 150 mm de manera vertical entre las placas de carga a compresión uniaxial, utilizando dos punzones circulares de acero dispuestos concéntricamente encima y debajo de la muestra a ensayar como los de la **Imagen 28**.

Al realizar el ensayo doble punzonamiento la carga aplicada produce un incremento de la tracción sobre los planos que contienen el eje del cilindro y la muestra se fractura a lo largo de estos planos. Generalmente, suelen aparecer tres



fisuras radiales en la muestra ensayada, todo y que se puede dar el caso de formación de 2 o 4 fisuras. Bajo la carga de rotura, se forman además dos cuñas cónicas que se sitúan bajo los punzones de acero.

Este método de ensayo cubre la determinación del módulo de elasticidad secante (de Young) y la relación de Poisson en cilindros de hormigón moldeados y núcleos de hormigón taladrados cuando son sometidos a esfuerzos de compresión longitudinal.



**Imagen 28** - Ensayo de doble punzonamiento

Los valores del módulo de elasticidad y relación de Poisson, aplicables dentro del rango de esfuerzos de trabajo (0 a 40% de la resistencia última del hormigón), puede ser usada en el dimensionamiento de elementos estructurales reforzados y no reforzados para establecer la cantidad de la armadura y calcular los esfuerzos para las deformaciones observadas.

Los valores del módulo de elasticidad obtenido serán usualmente menores que el módulo derivado de aplicación de carga rápida (por ejemplo, cargas dinámicas o sísmicas), y usualmente serán mayores que los valores obtenidos bajo aplicación de carga lenta o extendiendo la duración de la carga, manteniendo las otras condiciones de ensayo.

La deformación puede ser medida por un dial usado directamente o por un sistema multiplicador de palanca, por un deformímetro de alambre o por un transformador diferencial lineal variable. Si la distancia del vástago pivotado y el medidor del plano vertical que pasa a través del punto de soporte del yugo rotativo son iguales, la deformación del espécimen es igual a un medio la lectura del dial. Si estas distancias no son iguales.

El módulo de elasticidad y la resistencia pueden ser obtenidos en la misma carga suministrada, aun cuando los deformímetros sean prescindibles, removibles o adecuadamente protegidos.

#### 4C1D. FLEXIÓN

La flexión de los hormigones se mide aplicándole a una probeta prismática, un momento flector mediante la aplicación de una carga a través de rodillos superiores e inferiores. Se registra la carga máxima aplicada y se calcula la resistencia a flexión.

La norma EN-12390-5:2009 permite dos tipos de dispositivos, con dos rodillos superiores o con uno, en este caso se hará con un solo rodillo superior.

La resistencia a flexión, para ensayo con carga en punto central, viene dada por la fórmula:

$$f_{cf} = \frac{3 \times F \times l}{2 \times d_1 \times d_2^2}$$

Donde:  $f_{cf}$  es la resistencia a flexión, en MPa (N/mm<sup>2</sup>);  $F$  es la carga máxima, en N;  $l$  es la distancia entre los rodillos soportes, en mm;  $d_1$  y  $d_2$  son las dimensiones laterales de la probeta, en mm.

#### 4C2. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO.

La reología es la rama de la física que estudia los principios que regulan el movimiento de los fluidos. Es una parte de la mecánica de medios continuos que trata la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir.

La importancia de las propiedades del hormigón fresco radica en que puede adoptar formas distintas, a voluntad del proyectista y esta forma se mantendrá en su estado endurecido. De hecho, esta capacidad da nombre al material ya que la palabra hormigón procede del término latino *formico* que significa moldeable o dar forma.

La docilidad es un término relacionado con la reología. Significa que se deja trabajar con facilidad, es decir, que sus propiedades reológicas permiten la trabajabilidad. La EHE-08 (2009), exige en hormigones armados, la docilidad necesaria para que, con los métodos previstos en la puesta en obra y compactación, el hormigón envuelva las armaduras sin solución de continuidad con los recubrimientos exigibles y rellene completamente los encofrados sin que se produzcan oquedades. Dichas exigencias se recogen en la **Tabla 69**.

La docilidad se valorará determinando su consistencia mediante el ensayo de asentamiento que se tratará más adelante. La problemática de cada elemento de hormigón será lo que determine el tipo de consistencia.

Con el LWC la necesidad de realizar ensayos gana importancia ya que los áridos modifican sustancialmente las propiedades reológicas respecto del NC.

**Tabla 69 – Consistencias y valores límite de asentamiento.[104]**

Tipo de consistencia	Asentamiento en cm
Seca (S)	0 – 2
Plástica (P)	3 – 5
Blanda (B)	6 – 9
Fluida (F)	10 – 15
Líquida (L)	16 – 20

○ Ensayo del cono de Abrams

Es el más conocido y utilizado para conocer la trabajabilidad del hormigón fresco. Mide la consistencia y está estandarizado por las normas ASTM C143 en E.E.U.U. o la EN 12350-2 europea.

Consiste en rellenar un cono como el de la **Imagen 29**, con hormigón en tres capas compactando cada una, darle la vuelta al cono, levantarlo y medir la altura del hormigón. La norma española EHE-08 (2009), prescribe un asentamiento no inferior a 60 mm y en hormigones para bombeo los valores no deben ser superiores a 100mm. La consistencia según el cono de Abrams se clasifica según la **Tabla 70**.

**Tabla 70 - Valores de consistencia mediante cono de Abrams**

Consistencia	Asiento (mm)
Seca	0 - 20
Plástica	30 - 50
Blanda	60 - 90
Fluida	100 - 150



Imagen 29 - Cono de Abrams

#### 4C2A. ESTABILIDAD DIMENSIONAL

La retracción es una pérdida de volumen que depende del tiempo. Las más significativas en el hormigón son la autógena y la retracción por secado. La segunda se produce en los últimos días del fraguado y es debida a la pérdida de humedad del hormigón. La autógena ocurre en el interior de la pieza, sin contacto con el ambiente y también está relacionada con la hidratación del cemento. Ambas son más altas cuanto más alta sea la relación  $a/cm$ . Ambas son menores en el LWC, que los NC, si los áridos son porosos y han sido sometidos a prehumedecido, esto ocurre por dos causas.

- Por un lado, porque el agua absorbida por los áridos hidratará el cemento lentamente; la retracción se produce al ocupar el hormigón bajo carga los huecos dejados por el agua, si esta agua no deja hueco porque estaba alojada en los poros de los áridos, este volumen no se perderá.
- Por otro lado, el buen comportamiento de la ITZ de la mayoría de los LWA no permite que el árido se desprenda del cemento y por lo tanto será más complicado para el cemento rellenar los huecos dejados por el agua



**4C2B.** EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS HORMIGONES DURANTE EL FRAGUADO.

La reacción que supone la hidratación del cemento Portland es altamente exotérmica y tiene un desarrollo rápido durante las primeras horas disminuyendo progresivamente hasta igualarse con la temperatura ambiente al cabo de unos días. Dado que este calor depende de sus componentes y en este caso la cantidad de cemento utilizada es alta, merece la pena un análisis de esta temperatura para prevenir algunos problemas como excesiva retracción o agrietamiento.

El ensayo se trata de introducir una sonda que mide la temperatura en una probeta durante 48 horas, también se toma la temperatura ambiente, que debe estar a  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . (Imagen 30 e Imagen 31)



Imagen 30 –Termopar, modelo RC-4 marca Elitech



Imagen 31 – Probeta prismática con las sondas térmicas



#### 4C2C. RETRACCIÓN

En este caso, la retracción se medirá con probetas prismáticas que tras el desmoldado se protegen con bolsas hasta llegar al lugar de ensayo con temperatura estable y controlada 20°C y humedad 50%.

Las probetas se colocan en posición vertical sobre un soporte metálico con un comparador de 1µm de precisión sobre la parte superior de la probeta (**Imagen 32**). Se toman lecturas cada 24 horas durante los primeros 15 días y pasados estos, 3 veces por semana, hasta los 45 días.



**Imagen 32** – Detalle de la parte superior de dos probetas durante el ensayo con el comparador sobre ellas.

#### 4C3. ENSAYOS DE DURABILIDAD

##### 4C3A. POROSIMETRÍA POR INTRUSIÓN DE MERCURIO (PIM)

Se mide mediante un porosímetro de mercurio, esto es un equipo de intrusión, mediante presión, de un líquido con baja humectabilidad (mercurio) para determinar la distribución de tamaño de poros en una muestra sólida porosa.

La presión de mercurio aumenta automáticamente, hasta un máximo de 220 MPa, y la medida del volumen introducido en el material se relaciona con la porosidad. El rango de medida de poros está comprendido entre 7 nm y 0,4 mm.

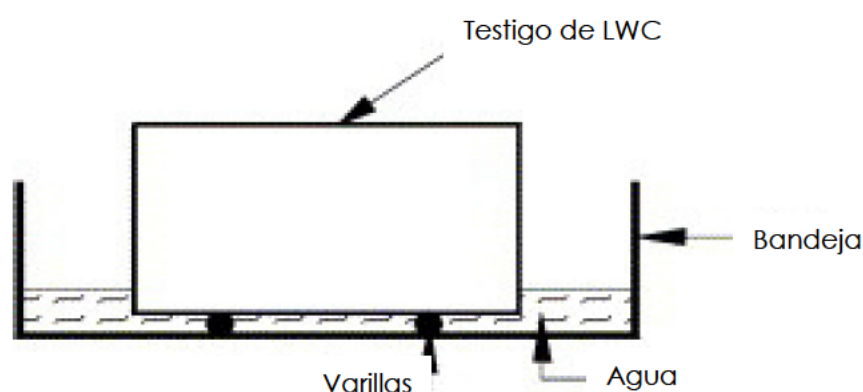
$$v = \frac{m}{A \rho}$$

donde  $m$  = masa (g);  $A$  = sección transversal del testigo (mm<sup>2</sup>);  $\rho$  = densidad del agua (~ 1000 Kg/m<sup>3</sup>).

## 4C3B. ABSORCIÓN DE AGUA POR CAPILARIDAD

El ensayo consiste en medir la cantidad de agua absorbida por una muestra de hormigón por capilaridad.

Se realiza con probetas cilíndricas de alrededor de 5cm de altura y 15 cm de Ø, tras el curado de 28 días se secan en estufa a 60°C durante 48 horas y se introducen en bolsas herméticas hasta el ensayo a temperatura estable, una vez estabilizada la temperatura se introducen en una cubeta sobre unas varillas de forma que no toquen la base de la cubeta y el nivel de agua se mantenga  $3 \pm 1$  mm sobre la base de la probeta (**Figura 94**) y las probetas no tengan contacto entre ellas.



**Figura 94-** Diagrama esquemático del ensayo de sortividad. [20]

Una vez introducidas, las probetas se sacarán, eliminando el exceso de agua y se pesan, durante las primeras horas a cortos periodos, luego diariamente y más tarde 3 veces por semana.

Los valores que conseguir son, el coeficiente de absorción capilar, la porosidad efectiva del hormigón y la resistencia a penetración del agua por absorción capilar. El valor definitivo será la media de 3 probetas. Los valores se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$K = \frac{\delta_a * \varepsilon_c}{10 * \sqrt{m}}$$

$$\varepsilon_c = \frac{Q_n - Q_0}{A * h * \delta_a}$$

$$m = \frac{t_n}{h^2}$$

Donde

K es el cociente de absorción capilar(kg/m<sup>2</sup>mm<sup>0.5</sup>)

$\delta_a$  es la densidad del agua (se considera el valor de 1 g/cm<sup>3</sup>)

$\varepsilon_c$  es la porosidad efectiva del hormigón (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)

m es la resistencia a la penetración del agua por la absorción capilar (min/cm<sup>2</sup>)

Qn es el peso de la probeta al alcanzar la saturación (t=tn)(g)

$Q_0$  es el peso de la probeta antes de empezar el ensayo ( $t=0$ ) (g)

$A$  es la sección de la probeta ( $\text{cm}^2$ )

$H$  es el espesor de la probeta (cm)

$t_n$  es el periodo de tiempo necesario para alcanzar la saturación (min)

Los ensayos de capilaridad de la norma UNE\_EN 83982. 2008 y los de sortividad de la norma ASTM-C1585 son muy similares y a nuestro criterio comparables en algunos aspectos, por ello, y dado que la cantidad de estudios realizados bajo esta última norma son muy superiores a los de la anterior, se puede comparar, adaptando los datos a los de su formulación, con un gran número de artículos situando así los hormigones de este trabajo.

La sortividad o absorptividad mide la capacidad de un medio para absorber agua por capilaridad, la norma determina una sortividad inicial, la que mide la absorción en las 6 primeras horas, y la secundaria, a partir de las 24 horas. Esto se debe a que los ritmos de absorción son diferentes en estos dos periodos. La sortividad se mide según las ecuaciones siguientes:

$$S = \frac{I}{t^{0.5}}$$

$$I = \frac{W_2 - W_1}{A * d}$$

Donde:

$S$  es la Sortividad ( $\text{mm/s}^2$ ),

$t$  es la Tiempo (s),

$W_2$  es el peso total absorbido (gr),

$W_1$  es el peso al salir del horno (gr),

$A$  es la Superficie por la que el agua penetra ( $\text{mm}^2$ ) y

$d$  es la densidad del agua ( $0.001 \text{ gr/mm}^3$ ).

#### 4C3C. PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE AGUA A PRESIÓN

Se determina mediante el siguiente ensayo: Se tapa con resina epoxi un lado del testigo para asegurarse de que el agua sólo vaya en una dimensión, se somete a una presión de alrededor de 0.75 MPa durante 14 días, se mide la masa del testigo. Tras el ensayo se parte la pieza longitudinalmente en dos mitades y se mide la profundidad de la penetración del agua. el coeficiente de permeabilidad al agua se calcula por la ecuación de Valenta:

$$K_p = \frac{d^2 \cdot v}{2 \cdot h \cdot t}$$

donde

$K_p$  es el coeficiente de permeabilidad del agua ( $\text{m/s}$ );

$d$  es la profundidad de penetración del agua (m);

$v$  es la porosidad del hormigón;

$h$  es la pérdida de carga de agua (m); y

$t$  es el tiempo bajo presión (s)

### 4C3D. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN ACELERADA

Este ensayo se realiza según la norma UNE 83993-2 y se basa, citando la norma; se basa en la determinación de la profundidad de carbonatación de un hormigón endurecido suponiendo el avance difusivo del  $\text{CO}_2$  por fronteras móviles hasta producir un frente de carbonatación que se identifica mediante la aplicación del ensayo colorimétrico de la fenolftaleína. (**Imagen 33**).



**Imagen 33** – Probetas ensayadas tras rociar con fenolftaleína

Las probetas, en este caso prismáticas de 100x100x400mm, se introducen en un recinto estanco donde se someten a una corriente uniforme de  $\text{CO}_2$  al 3% y una temperatura y humedad constantes.

### 4C3E. INTERFAZ ÁRIDO-PASTA

Se trata de un análisis por microscopía que permita diferenciar la zona interfacial y analizar las posibles fisuras entre la pasta cementicia y los diferentes áridos.

### 4C3F. PENETRACIÓN DE IONES CLORURO ACELERADA

El método utilizado fue el llamado “método de inmersión”, que muestra el comportamiento del hormigón frente a la penetración de cloruros. Las probetas fueron prismáticas, de 100x100x400mm que una vez curadas se protegen sus laterales con cinta impermeable enmarcando la superficie que contendrá el cloruro sódico utilizando el método colorimétrico por nitrato de plata para medir, a los 56 días, la profundidad de penetración. (**Imagen 35** e **Imagen 34**)





Imagen 34 – Probetas ya ensayadas tras el rociado con nitrato de plata.



Imagen 35 - Probetas preparadas para ensayo de cloruros



## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 5A. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se mostrarán los resultados de los ensayos realizados, así como las conclusiones a las que llevan los mismos.

## 5B. RESULTADOS FASE II

En la fase II se fabricaron hormigones con todos los materiales preseleccionados y tras medir su densidad se les sometió a rotura a compresión, esta fase permitió desechar materiales y acotar cantidades.

Las dosificaciones se detallaron en el capítulo 3 por lo que ahora sólo se aportarán los datos de los ensayos en sí con la misma nomenclatura aportada con anterioridad.

**Tabla 71** – Resultados compresión y densidad de hormigones con áridos tradicionales sin fibras

MEZCLA	RESULTADOS ENSAYOS		
	Resistencia a Compresión a 7 días (MPa)	Resistencia a Compresión a 28 días (MPa)	Densidad media kg/m <sup>3</sup>
CCHA30-AM1	32,4	38,0	2396,0
REF1	52,2	-	2393,0
AM1-N2	59,4	61,1	2300,0
CEM700 40%A	68,7	47,1	2297,6
CEM800 40%A	58,3	75,1	2288,2
CEM900 40%A	48,8	78,1	2310,4
CEM700 60%A	59,1	7,0	2291,2
CEM800 60%A	67,7	72,4	2284,0
CEM900 60%A	78,8	67,4	2300,8
CEM700 60%A AN	70,5		1545,2
CEM700 66%A	68,3	75,4	2310,9
CEM800 66%A	71,1	7,7	2273,4
CEM900 66%A	67,7	79,2	2223,8
CEM700 A/C0,24	66,2	-	1555,0
CEM550 A/C0,24	56,6	-	1784,2

**Tabla 72** – Resultados compresión y densidad de hormigones con fibras.

MEZCLA	RESULTADOS ENSAYOS		
	Resistencia a Compresión a 7 días (MPa)	Resistencia a Compresión a 28 días (MPa)	Densidad media kg/m <sup>3</sup>
AM3-FN	62,4	65,1	2232,0
AM4-F	54,7	56,4	2142,0
AM1-HUAR	50,6	60,5	2354,0
AM4-HUAR2	39,2	57,0	2425,0
AM1	54,2	65,0	2320,9
AM3	56,6	64,4	2363,0
A4 Fib. PVA	68,8	-	2250,4
A5 F. Esparto	67,1	-	2256,0
A6 F. Acero	73,0	-	2282,8
A7 F. MSF 22	62,5	-	2245,1
A8 Ref.	70,1	-	2248,7

Tabla 73 – Resultados compresión y densidad de hormigones ligeros

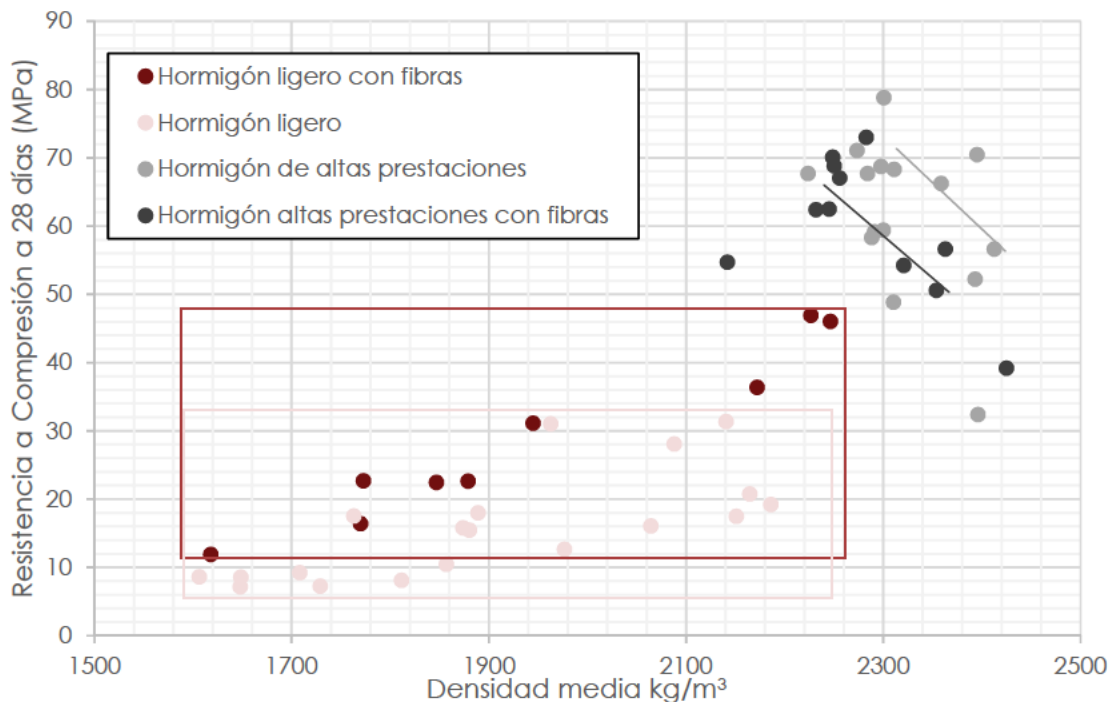
MEZCLA	RESULTADOS ENSAYOS	
	Resistencia a Compresión a 7 días (MPa)	Densidad media kg/m3
AM2-P	28,1	2088,0
AM3-P	18,0	1889,0
alfafil 100%	17,5	1763,2
alfaten 100%	7,2	1729,0
neumat 100%	10,5	1857,0
corcho 100%	7,2	1647,9
eps 100%	9,2	1708,1
alfafil 73%	15,4	1880,3
alfaten 73%	8,1	1811,4
neumat 73%	12,6	1976,6
corcho 73%	8,6	1606,3
eps 73%	8,6	1648,5
corcho trit 73%	15,8	1874,0
alfafil 37%	31,4	2140,7
alfaten 37%	19,2	2186,0
neumat 37%	20,7	2164,5
corcho 37%	31,0	1962,9
eps 37%	16,1	2064,4
corcho trit 37%	17,5	2151,0
Ref Áridos	78,2	2302,6

Tabla 74 – Resultados compresión y densidad de hormigones ligeros con fibras

MEZCLA	RESULTADOS ENSAYOS		
	Resistencia a Compresión a 7 días (MPa)	Resistencia a Compresión a 28 días (MPa)	Densidad media kg/m3
AM5-CPF	22,6	22,3	1879,0
AM6-CPF	11,9	7,0	1618,0
AM1-CPFN	31,1	32,5	1945,0
AM2-CFN	22,5	25,0	1847,0
PVA	46,9	51,8	2226,8
FE-PLAST	36,4	41,6	2172,1
NEU-PVA	46,0	53,3	2246,4
AM2-HARL	22,7	23,1	1773,0
AM3-HARLE	16,4	18,0	1770,0

## 5B1. DISCUSIÓN RESULTADOS FASE II.

En la **Figura 95** se muestran los resultados, de resistencia a compresión y densidad, de todas las mezclas. Se observa cómo, mientras los hormigones ligeros siguen cierto patrón agrupándose en torno a ejes los que contienen áridos tradicionales no ligeros se agrupan en torno a unos valores en los que las variaciones son más ligeras. El uso de fibras no parece mejorar la resistencia, también se puede destacar que los hormigones con resistencia en los límites de ser estructural tienen densidades, en general, por encima de los 2000kg/m<sup>3</sup>.



**Figura 95-** Tabla resistencia- Densidad por tipos de hormigón

La fabricación de hormigones con áridos tradicionales tenía como objetivo fijar la cantidad de cemento y la proporción de arena respecto de la grava, la **Figura 96** muestra como las resistencias más altas se consiguen con muy altas cantidades de cemento y con 60% de arena, sin embargo estos resultados llevaron a pensar en que, para estas dosificaciones las resistencias eran demasiado bajas para conseguir los objetivos y se realizó una prueba más con otro tipo de arena, el llamado en este trabajo arena tipo B, los resultados fueron positivos elevando las resistencia y se decidió por ello que en los hormigones definitivos en la fase IV se utilizaría esta arena siempre que la fase III confirmara estos resultados.

El uso o no de las fibras es otro punto a decidir en esta fase, las **Figura 97** y la **Figura 98** toman sus datos de los hormigones llamados A4, A5, A6, A7 y A8 que tienen la misma dosificación de todos los componentes variando sólo las fibras que se dosificaron por volumen también a las mismas cantidades. Se observa cómo, a excepción de las fibras de acero, el resto reducen resistencia y como, por otro lado, las fibras de acero elevan sustancialmente la densidad.

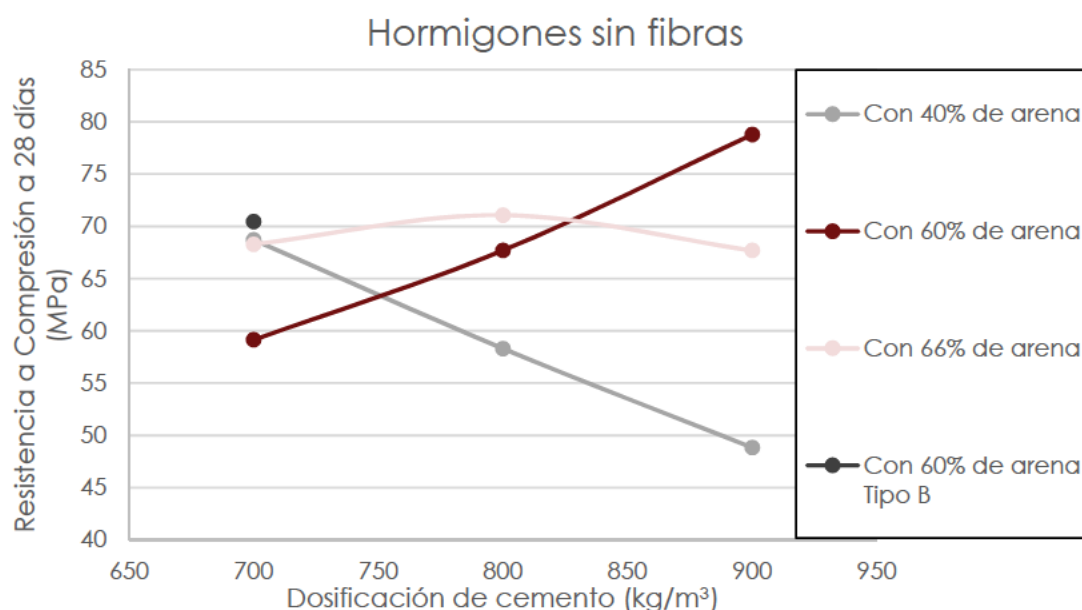


Figura 96 – Relación resistencia-cantidad de cemento

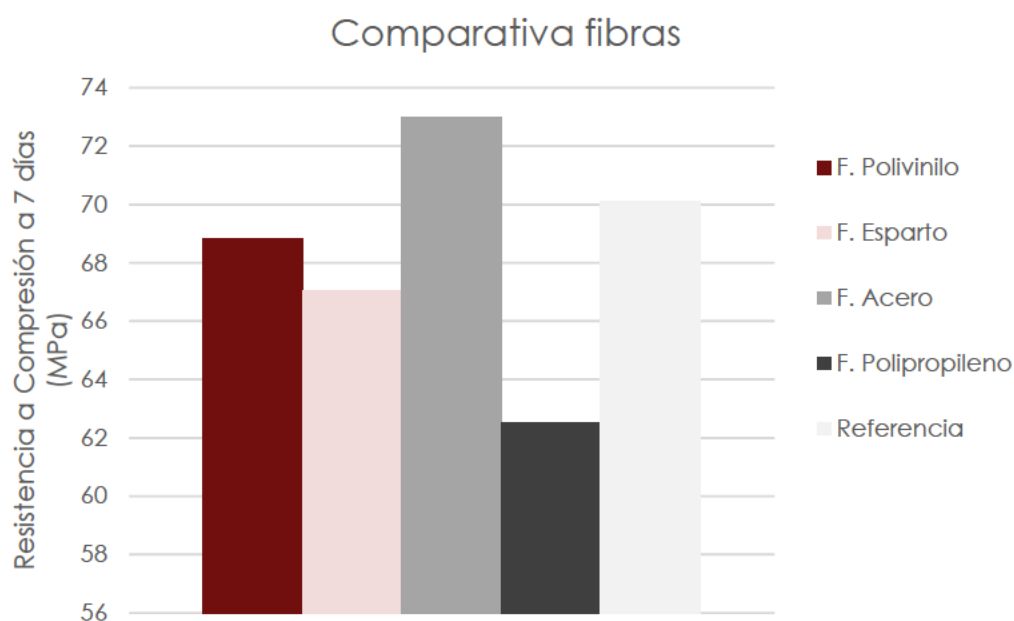


Figura 97 – Resistencias a compresión a 7 días de los hormigones con fibras

Respecto a los hormigones ligeros, los resultados tenían que sugerir el uso de algunos áridos y desechar el resto, así como las cantidades de estos, la **Figura 99** y la **Figura 100** ofrecen la información necesaria.

En ambas figuras se aprecia como el plástico Alfafil y el corcho consiguen resistencias más altas y el corcho el material que consigue reducir más la densidad del hormigón, la **Figura 100** muestra cómo, dosificaciones bajas hacen muy difícil conseguir hormigones con resistencia estructural.



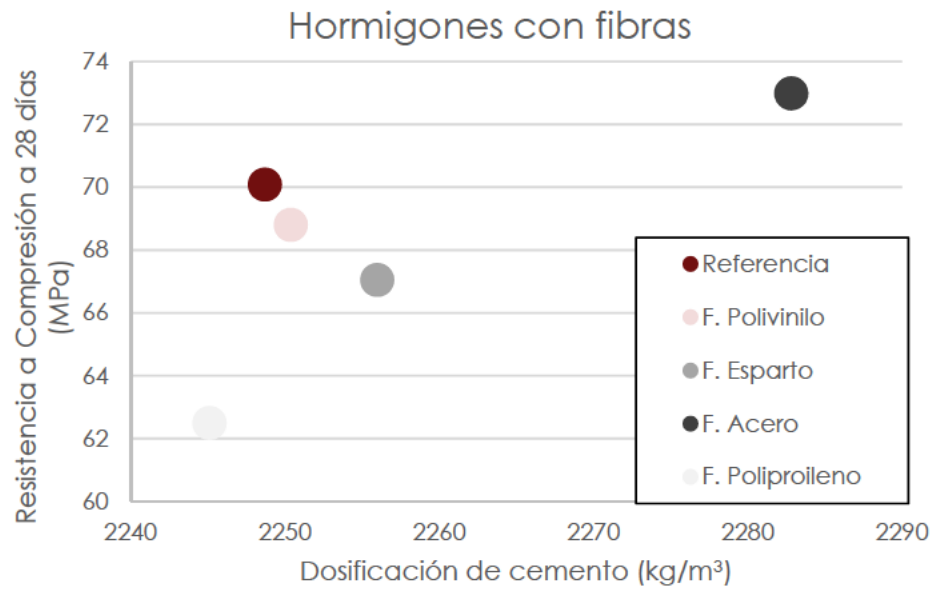


Figura 98 – Relación resistencia – densidad, de hormigones con fibras

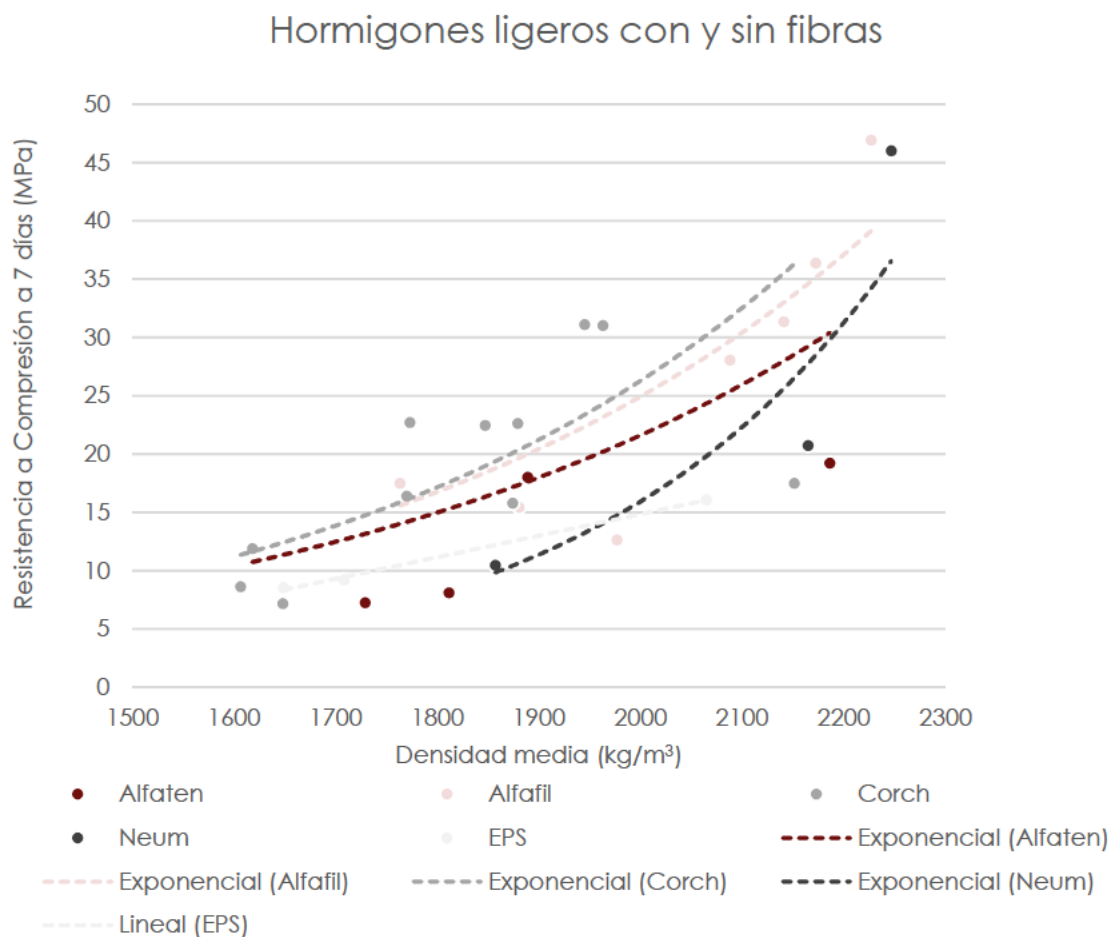


Figura 99 – Resistencia-Densidad de hormigones ligeros

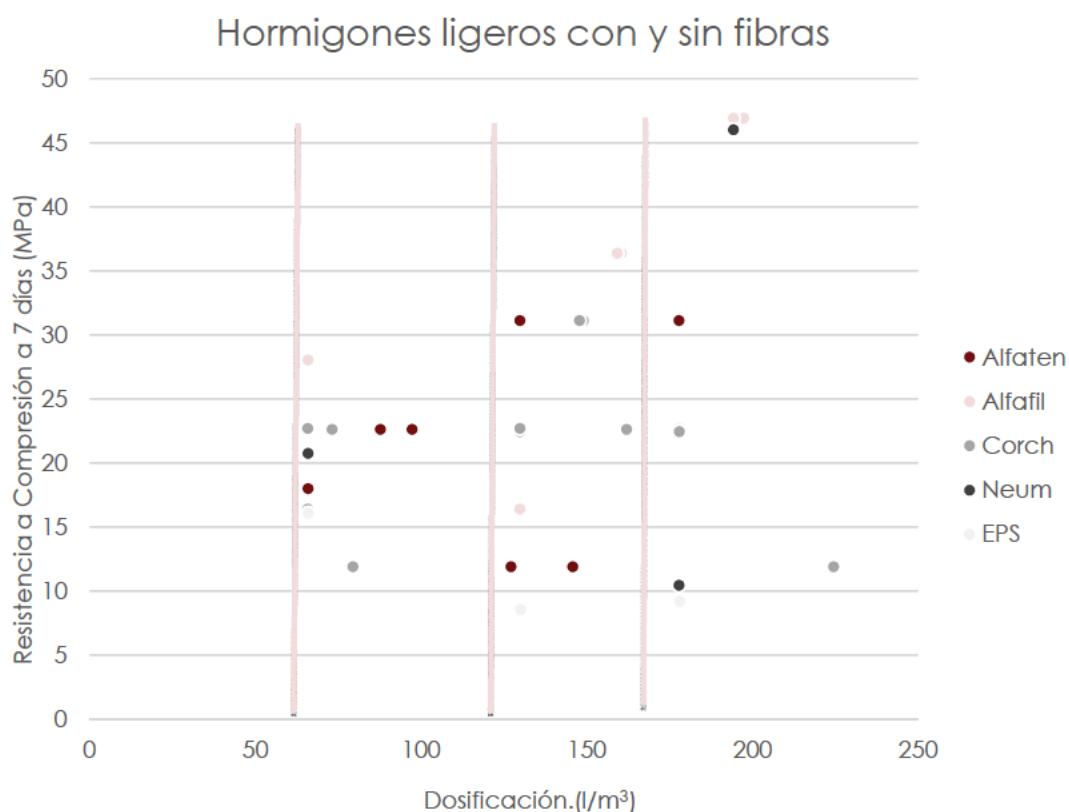


Figura 100 – R. Compresión – dosificación áridos de los hormigones ligeros

### 5C. RESULTADOS FASE III

En esta fase se fabricaron morteros normalizados.

El objeto de esta fase fue caracterizar los materiales con el fin de ajustar su uso y proporción por lo que los resultados ya se expusieron y comentaron en el capítulo 4 del presente trabajo dedicado a los materiales y procedimientos.

Como conclusión de ajustó la dosificación de los prototipos que se fabricaron en la fase IV. Estos incluyeron, como adiciones, CV, Ns y lodos de papel calcinados. Como LWA, un 18,5% de corcho y 29,5% de plástico Alfafil y como aditivo, el SP. Se decidió no incluir fibras en las dosificaciones definitivas.

### 5D. RESULTADOS FASE IV

Como resultado de las fases anteriores se definen las dosificaciones expuestas en el capítulo III (tabla 11) y se pasa a fabricar el hormigón necesario para los ensayos de la fase V.

Las amasadas de realizaron a lo largo de 5 días dedicándose 1 día por mezcla, excepto las mezclas con lodos que se hicieron ambas en un solo día, se realizaron varias amasadas por dosificación.

Los hormigones se fabricaron en mezcladora eléctrica rotacional (**Imagen 37** e **Imagen 40**) de 50 litros. En todos los casos primero se vertieron los áridos, se mezclaron luego se añadieron el cemento y las cenizas volantes (**Imagen 41**), se volvieron a mezclar y más tarde de añadió la mitad de la cantidad de agua de la mezcla (**Imagen 39**), se amasó durante 5 minutos y por último se añadieron el resto del agua

con el nanosílice (**Imagen 38**) y el superplastificante mezclándose todo durante 10 minutos.

Tras el amasado el hormigón se vertió en los moldes llenándose hasta la mitad y vibrándose con vibrador para después terminar de llenarse y volver a vibrar, los moldes se cubrieron con plástico para evitar la evaporación. Se desmoldaron a las 24 horas y se curaron en inmersión a temperatura estable de  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  (**Imagen 36**). Antes de cada ensayo, al tiempo de curado necesario, las probetas se sacaron de las cubetas de curado, se secaron y se mantuvieron a temperatura estable.



**Imagen 37** – Imagen de los materiales, amasadora y moldes antes del amasado



**Imagen 36** – Probetas cilíndricas en cubeta para curado en inmersión.





Imagen 38– Vertido del Ns



Imagen 39 – Vertido del agua



Imagen 40 – Proceso de amasado



Imagen 41 - Materiales

## 5E. RESULTADOS FASE V

En la fase V se procede a realizar los ensayos definidos en los capítulos 3 y 4 con el fin de conocer la idoneidad o no de los hormigones diseñados para su uso estructural.

### 5E1. RESULTADOS ENSAYOS RESISTENCIA MECÁNICA

Compresión, Módulo elástico, densidad y tracción indirecta.

En la **Tabla 75** se muestran los resultados de la media de las roturas a compresión a 7, 28 y 90 días de las probetas cilíndricas destinadas a ello, así como los resultados del módulo elástico a 28 días, en la **Tabla 76** aparecen los datos de los ensayos de módulo a 90 días, densidad media y tracción indirecta según se definió en el capítulo IV.

A las mezclas con áridos reciclados se les denominó con el prefijo ECO diferenciándolas de las de peso normal. Si bien estas dosificaciones cuentan con una elevada proporción de cemento, en este caso se ha destacado el hecho de que se utiliza un material como es el plástico, que en la actualidad supone uno de los mayores problemas medioambientales a nivel mundial y que, un hormigón con menor peso, permite utilizar menos cantidad en su uso estructural.

**Tabla 75** – Resultados compresión 7, 28 y 90 días y densidad.

MEZCLA	RESULTADOS ENSAYOS			
	Resistencia a Compresión a 7 días (MPa)	Resistencia a Compresión a 28 días (MPa)	Resistencia a Compresión a 90 días (MPa)	Densidad media kg/m <sup>3</sup>
HPC550	71,5	83,2	97,0	2291,6
HPC550+LODOS	78,3	85,0	98,3	2368,3
HPC700	74,6	88,7	102,6	2341,4
ECO-HPC550	27,8	26,2	30,2	1873,0
ECO-HPC550+LODOS	20,7	25,2	18,6	1798,7
ECO-HPC700	27,5	28,8	32,6	1891,2

**Tabla 76** – Resultados módulo elástico y tracción indirecta.

MEZCLA	RESULTADOS ENSAYOS				
	Módulo elástico inicial 28 días (GPa)	Módulo elástico estable 28 días (GPa)	Módulo elástico inicial 90 días (GPa)	Módulo elástico estable 90 días (GPa)	Tracción Indirecta (MPa)
HPC550	77,0	59,2	66,3	61,2	4,9
HPC550+LODOS	57,9	64,6	-	-	-
HPC700	44,6	48,4	86,5	52,1	5,3
ECO-HPC550	30,6	35,0	37,9	40,1	2,4
ECO-HPC550+LODOS	21,2	33,5	-	-	-
ECO-HPC700	32,3	35,2	34,3	38,0	2,2



## 5E2. DISCUSIÓN RESULTADOS ENSAYOS RESISTENCIA MECÁNICA

### 5E2A. COMPRESIÓN

En la **Figura 101** se muestran los resultados de los ensayos de resistencia a compresión y módulo elástico y su evolución en el tiempo de fraguado. El primer dato que destaca sería la reducción de la mejora que representa el alto contenido de cemento, (4.5% en promedio). Este hecho ya está justificado en la EHE, donde se comenta la limitación de la resistencia del cemento utilizado, en este caso, el tipo I, clase 52.5, que justifica que tanto dicho código EHE como otros, no recomienden el aumento de 500kg/m<sup>3</sup> a menos que su uso esté justificado con pruebas preliminares. Otra razón para el impacto mínimo sobre la cantidad de cemento en la resistencia es la dificultad que encuentra el cemento para hidratarse en concentraciones superiores a 500kg/m<sup>3</sup>. En morteros con alto contenido de cemento (entre 800 y 1000kg/m<sup>3</sup>), también llamado cemento en polvo reactivo (RPC), se logran resistencias muy altas, entre 200 y 800MPa, después de someter las mezclas a curado especial con vapor, alta temperatura o autoclave. E.Freyssinet [160] aplicó, en los años 30, la presión al hormigón fresco para aumentar su resistencia y durante los años 70, bajo presión y temperatura, Roy y Gouda [161] consiguieron hormigón con resistencia de 650MPa, más recientemente autores como Richard y Cheyrezy [162] ajustaron la composición del RCP. La temperatura y la presión hacen que el cemento y los aditivos reaccionen completamente alcanzando la máxima resistencia. La química de hidratación del cemento se altera al convertir C-S-H en silicato de calcio ( $\alpha$ -C2S) que en presencia de silicio (ya sea Ns, HS o CV) se convierte en tobermorita (C5S6H5). La proporción determinada de material amorfo y cristalino permite alcanzar la resistencia máxima del RPC. El objetivo del trabajo, que era un hormigón capaz de reemplazar el NC con el uso in situ, nos impide utilizar este tipo de tratamiento.

Otro punto digno de mención es el hecho de que los hormigones ligeros alcanzan su resistencia máxima antes, de hecho, con 7 días obtienen el 85% de su resistencia. Thorenfeldt [163] ya observó este comportamiento, señalando que LWC alcanza aproximadamente el 80% de su resistencia durante los primeros 7 días, posiblemente debido al límite de resistencia de los LWA. El modelo del Código FIB 2010 permite estimar la resistencia a la compresión de un hormigón diferente a 28 días de antigüedad, a través de las fórmulas (1) y (2):

(1)

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cm}$$

(2)

$$\beta_{cc} = \exp \left\{ s_c \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\}$$

Donde:

$f_{cm}$  es la resistencia a la compresión media en MPa a la edad de 28 días;

$\beta_{cc}$  es una función para describir el desarrollo con el tiempo, (Tabla 2).

$t$  Es la edad del hormigón, en días, en este caso, 7 and 90 días.

$\alpha_{sc}$  coeficiente que depende de la clase de resistencia del cemento. En este caso para las mezclas de HPC, es 0.20 y 0.25 para LWA de baja Resistencia.

La Tabla 77 muestra los resultados experimentales obtenidos y las estimaciones. Se observa que todos los datos estimados son más cercanos a los reales en más del 90%, excepto los valores del ECO-HPC a los 7 días, donde los valores estimados son alrededor del 80% de los reales.

Tabla 77 – Resultados de resistencia a compresión reales y estimados

		HPC550	HPC700	HPC550+LODOS	ECO-HPC550	ECO-HPC700	ECO-HPC550+LODOS
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )		2291,6	2341,4	2368,3	1873	1891,2	1798,7
Resistencia a Compresión (MPa)	7 días	71,5	74,59	78,3	27,12	27,46	20,7
	28 días	83,16	88,69	85	27,76	28,84	25,2
	90 días	96,96	102,57	98,3	30,19	32,61	18,6
	$f_{cm}(7)$ R. Comp. Estimada. 7 días (MPa)	68,09	72,61	69,59	21,62	22,46	19,63
	$\beta_{cc}$ 7 días	0,82			0,78		
	% de aprox. de R. Compresión estimada con la real	95,22%	97,34%	88,88%	79,72%	81,79%	94,81%
	$f_{cm}(90)$ R. Comp. estimada. 90 días (MPa)	90,85	96,89	92,86	31,01	32,21	28,15
	$\beta_{cc}$ 90 días	1,09			1,12		
	% de aprox. de R. Compresión estimada con la real	93,71%	94,46%	94,47%	-97,36%	98,78%	-66,08%

El tercer aspecto observable es el impacto negativo sobre la resistencia del uso de LWA. El ECO-HPC obtiene, en promedio, el 68% de la resistencia del HPC. Este hecho hace que sea necesario comenzar con hormigones de alto rendimiento, como el HPC, para poder alcanzar la resistencia admisible en el LWC y poder ser utilizado con uso estructural. Esta reducción en la resistencia también implica una disminución sustancial de la densidad. Los ECO-HPC tienen una reducción del 18.7% en la densidad de las HPC. La relación resistencia-densidad es lineal y justifica la disminución de la resistencia.

En la Figura 102, los hormigones fabricados en este estudio se comparan con los de otras investigaciones similares con árido de plástico. Se observa cómo se sitúan en la densidad promedio y en la resistencia más alta. La disminución sustancial en la resistencia del LWC con plástico puede deberse a que el material, como material impermeable, no absorbe agua como otros LWA tradicionales como la piedra pómez o arcilla expandida, que utilizan el agua absorbida para ralentizar el proceso de

hidratación, lo que mejora la ITZ, este comportamiento no ocurre en el plástico. También se debe a que se eligieron mezclas con plástico, donde el porcentaje de sustitución del árido fue entre 20 y 40% debido a que las mezclas del estudio sustituyeron el 30%.

El único caso que consigue superar sustancialmente la resistencia son las mezclas de Marzouk, Dheilly y Queneudec [44] en el que se debe comentar que no se hizo hormigón sino morteros, y se utilizaron áridos de plástico reciclado con tamaños de partículas de 1/5mm.

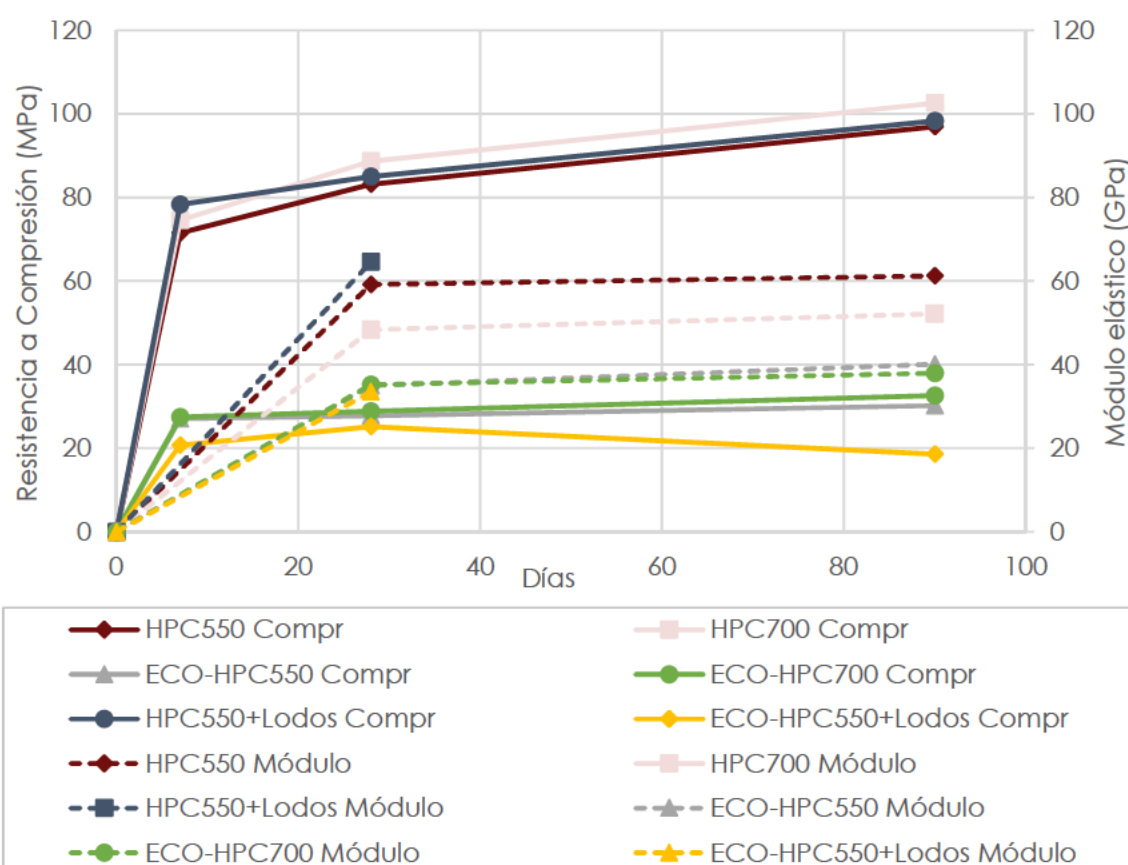


Figura 101 – Evolución de la resistencia a compresión y módulo elástico en el tiempo

El estudio análogo con el corcho se presenta en la **Figura 103** no se encontraron suficientes estudios para aproximarse a la proporción de este trabajo. Los analizados están en porcentajes entre 2 y 12%, mientras que las mezclas de este estudio reemplazan al 18%, a priori esto sería una desventaja, pero aun así se logra la mayor resistencia.

La **Figura 104** muestra los resultados de todos los hormigones seleccionados, de estos datos se puede deducir que el aumento de cantidad de cemento de 550 a 700 kg/m<sup>3</sup> no supone a penas mejora en la resistencia (un 4.5% de media) esto puede ser debido a la limitación de la resistencia del cemento tipo I 52,5 justificando normativas como la española EHE que no recomiendan subir de 500 kg/m<sup>3</sup> a no ser que se justifique su uso con ensayos previos, otro motivo por el que el hormigón no consigue elevar resistencia es la dificultad para hidratarse completamente en el caso del que contiene 700 kg/m<sup>3</sup>, para que los hormigones con tal cantidad hidraten se deben

curar con autoclave u otros métodos complejos y dado que en este caso se pretende emular las condiciones de obra no es posible aplicar este tratamiento.

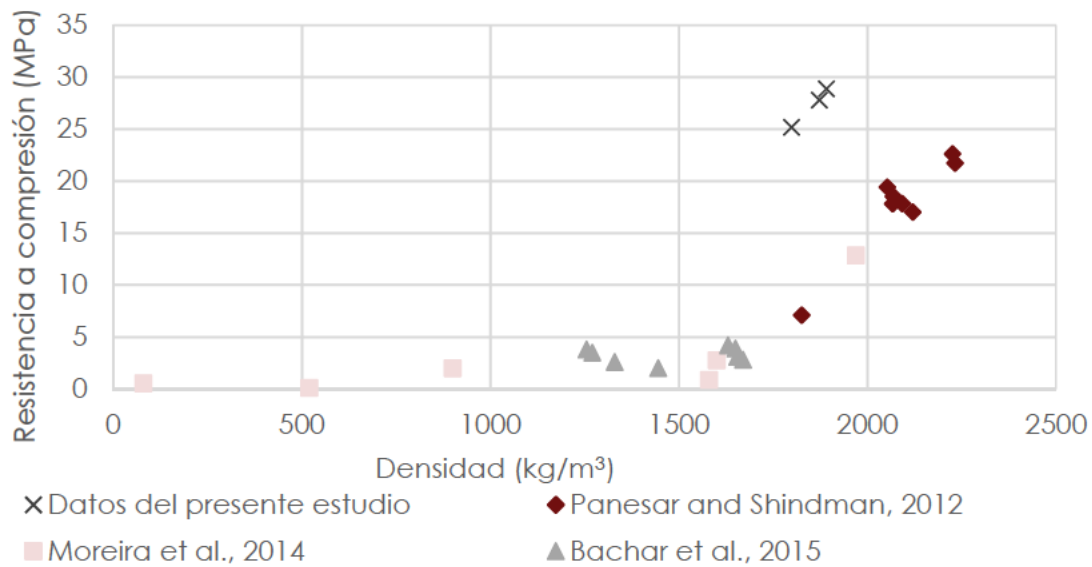


Figura 102 - Relación R. compresión–densidad de hormigones con árido plástico.

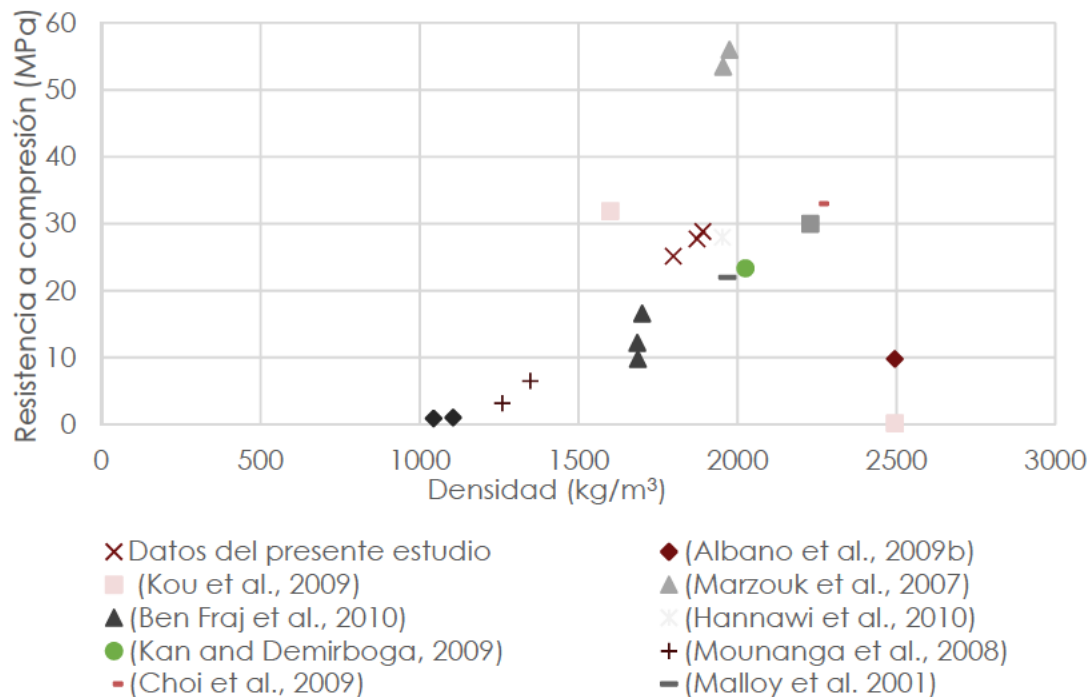
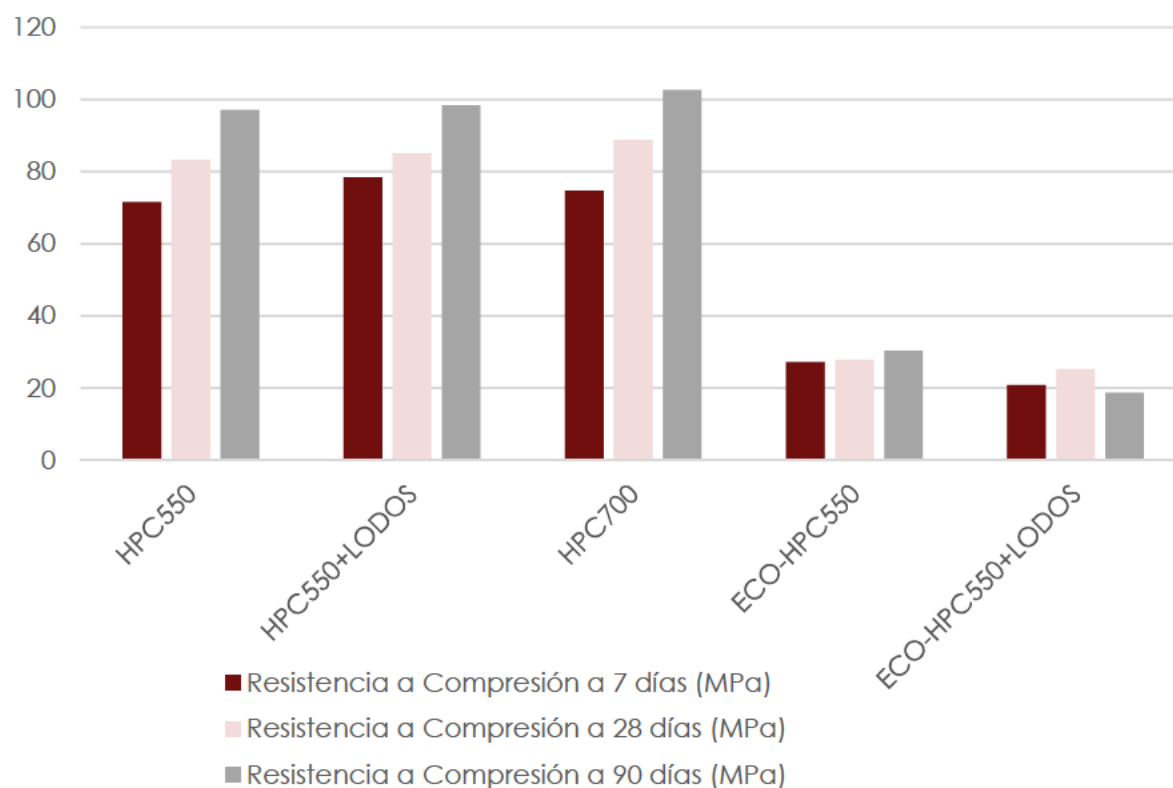


Figura 103 - Relación R. compresión–densidad de hormigones con árido de corcho.

Los hormigones ligeros son más rápidos que los NC en alcanzar casi el total (85%) de su resistencia, Thorenfeldt [163] ya observó este hecho, anotando que el LWC alcanza durante los primeros 7 días alrededor del 80% de su resistencia debido posiblemente al límite de la resistencia de los LWA. Como era previsible, el uso de los LWA seleccionados tiene un impacto negativo sobre el desarrollo de la resistencia a largo plazo al reducirla en un 31.5% en el caso del HPC 550 y un 32.5% en el del HPC 700, ambos casos a 28 días.

El uso de lodos calcinados, aunque consigue reducir la cantidad de cemento manteniendo la resistencia, no consigue elevarla como ocurrió con los morteros, esto puede ser debido a la complejidad del proceso de fabricación que lleve a un desigual comportamiento de las muestras.



**Figura 104** – Gráfico de los resultados de roturas a compresión

#### 5E2B. DENSIDAD

La densidad del hormigón se muestra en la **Tabla 75**. Se observa como el LWA logra reducir el peso en un promedio del 20.5%. La densidad de los HPC es más alta que en los NC que tienen un peso de alrededor de 2200kg/m<sup>3</sup>, especialmente el HPC700 que debido a su alto contenido de cemento obtiene un mayor peso, (el HPC700 tiene una relación de a/cm, en peso de 0.25 mientras que el HPC550 es 0.26); y el HPC 550 +lodos que debido a la densificación que suponen los lodos calcinados densifica el material y lo hace más compacto y pesado.

En la **Figura 105** se muestran los resultados en relación con la densidad y en la **Figura 106** se sitúan los ECO-HPC frente a los hormigones ligeros analizados en el estado del arte del presente trabajo.

Los ECOHPC se sitúan en la zona media de la tabla, dentro del rango de los hormigones estructurales relacionados con hormigones ligeros en su mayoría con áridos de arcillas expandidas, áridos de cenizas volantes o pumitas.



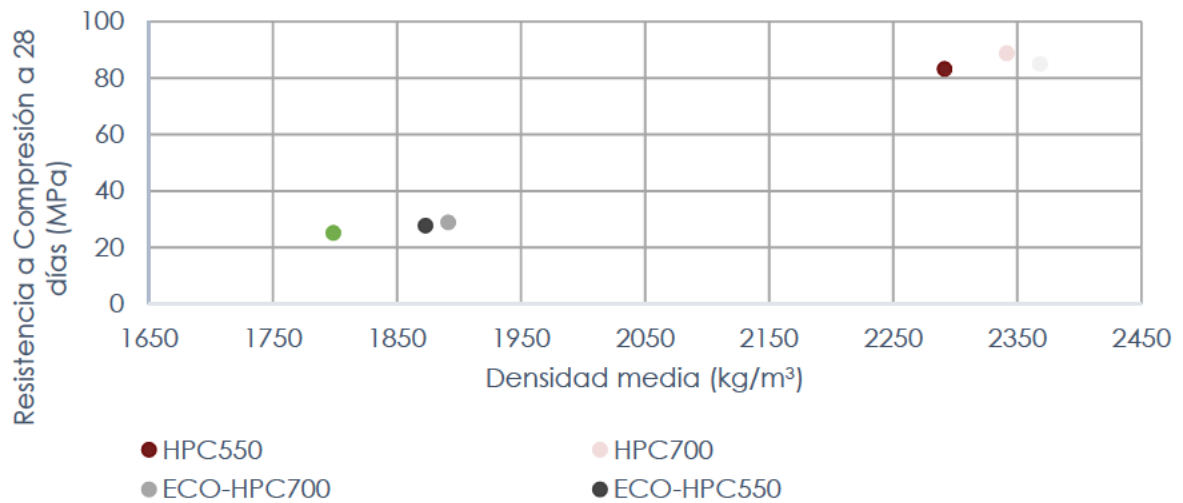


Figura 105 – Gráfica densidad – resistencia de los hormigones

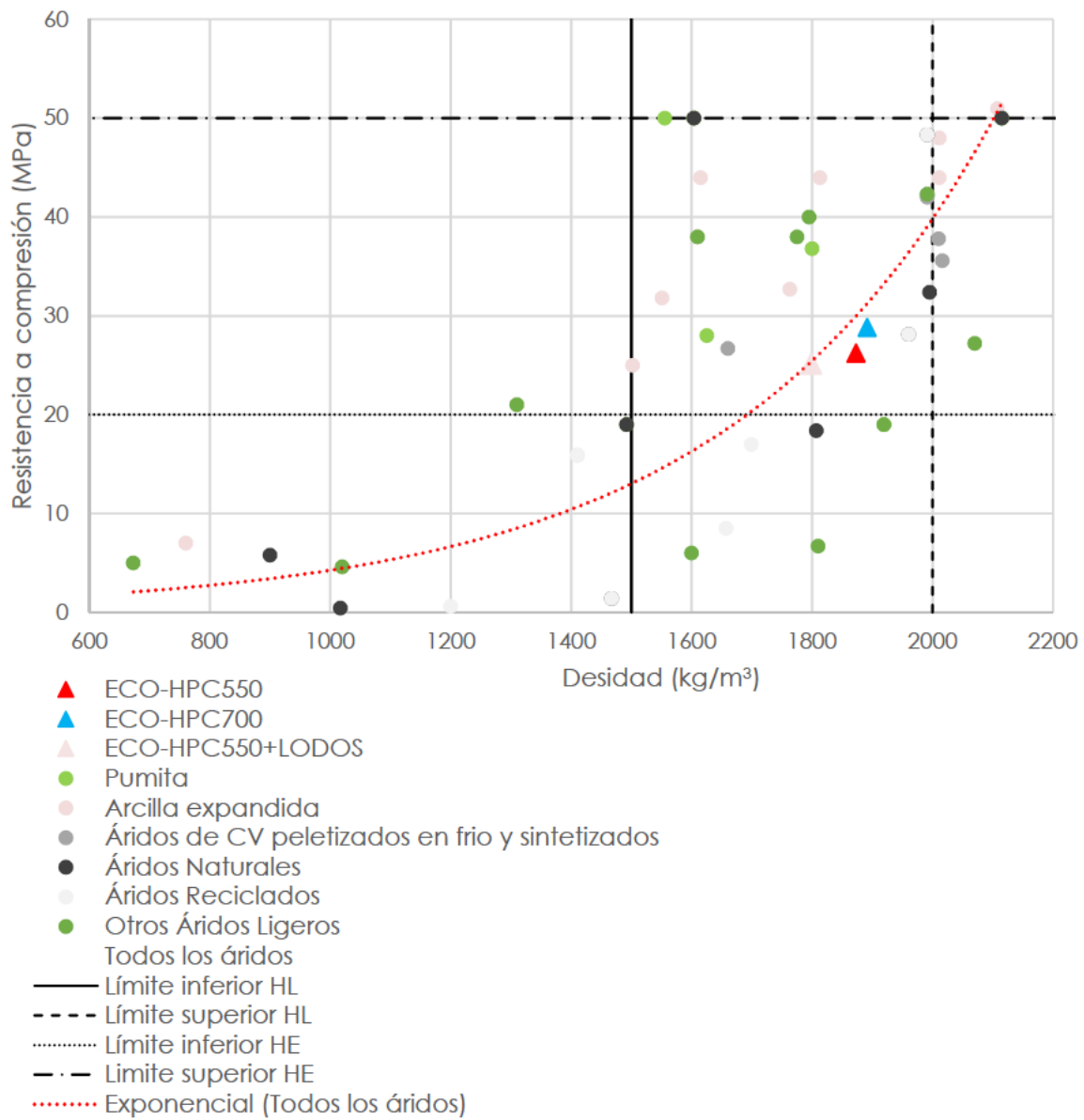


Figura 106 – Comparativa densidad – resistencia; estado del arte – ECO-HPC.

**5E2C. MÓDULO ELÁSTICO**

Los resultados del ensayo de módulo se presentan en la **Tabla 76**.

El valor del módulo de elasticidad puede estimarse, según el código modelo del FIB (International Federation for Structural Concrete) [164]

$$E_{ci} = E_{c0} \times \alpha_E \times \left( \frac{f_{ck} + \Delta f}{10} \right)^{1/3}$$

Donde:

$E_{ci}$  es el módulo de elasticidad en MPa para un hormigón de 28 días

$F_{ck}$  es la resistencia característica en MPa

$\Delta f = 8 \text{ MPa}$

$E_{c0} = 21.5 + 10^{-3} \text{ MPa}$

$\alpha_E$  es 1 para áridos de cuarzo

El módulo para hormigones ligeros puede ser estimado según la fórmula:

$$E_{lci} = \left( \frac{\rho}{2200} \right)^2 \times E_{ci}$$

Donde:

$\rho$  es la densidad del hormigón con árido ligero en  $\text{kg/m}^3$

Se recomienda para determinados casos, el uso de un módulo elástico reducido que se determina según:

$$E_c = \alpha_i \times E_{ci}$$

Donde:

$$\alpha_i = 0.8 + 0.2 \times \frac{f_{cm}}{88} \leq 1$$

Además, para los NC, pero con áridos distintos del cuarzo, proporciona valores de  $\alpha$  que varían entre 1.2 y 0.7, si aplicamos estos datos a los valores de resistencia a compresión de los hormigones, tanto el estado del arte como las pruebas del presente trabajo, obtenemos valores aproximados de máximos y mínimos usuales para el módulo elástico.

La **Figura 107** muestra los resultados de las pruebas de los hormigones analizados junto con los de la aplicación de las fórmulas anteriores y los datos de LWC de otros estudios en la literatura científica (Sanchez-Garcia, 2012). Se observa que, en los rangos de resistencias inferiores, en hormigones no estructurales, las estimaciones no parecen válidas. Los hormigones analizados se encuentran dentro del rango de las estimaciones, excepto el HPC 550, con y sin lodos, que tiene un módulo más alto de lo esperado.

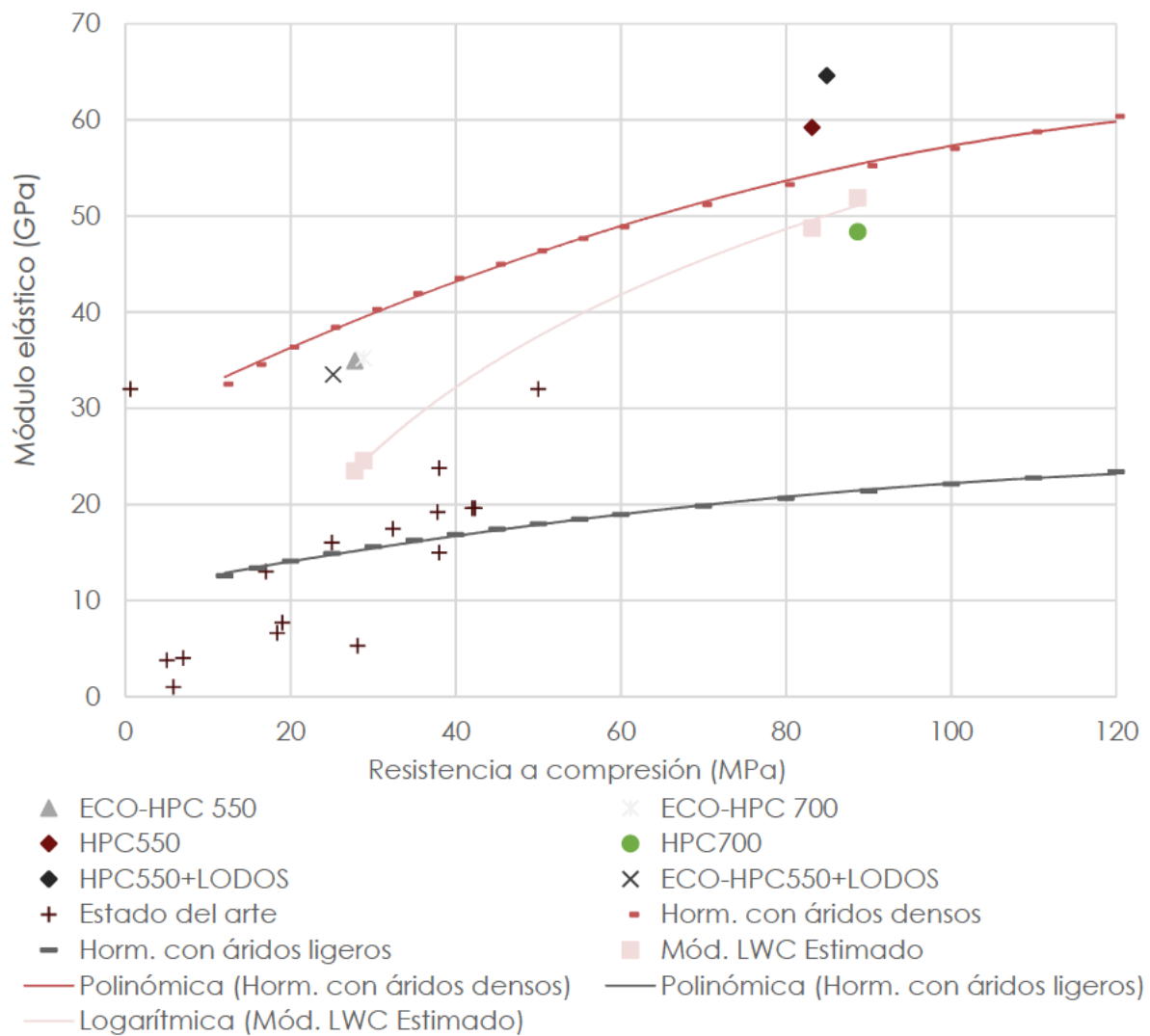
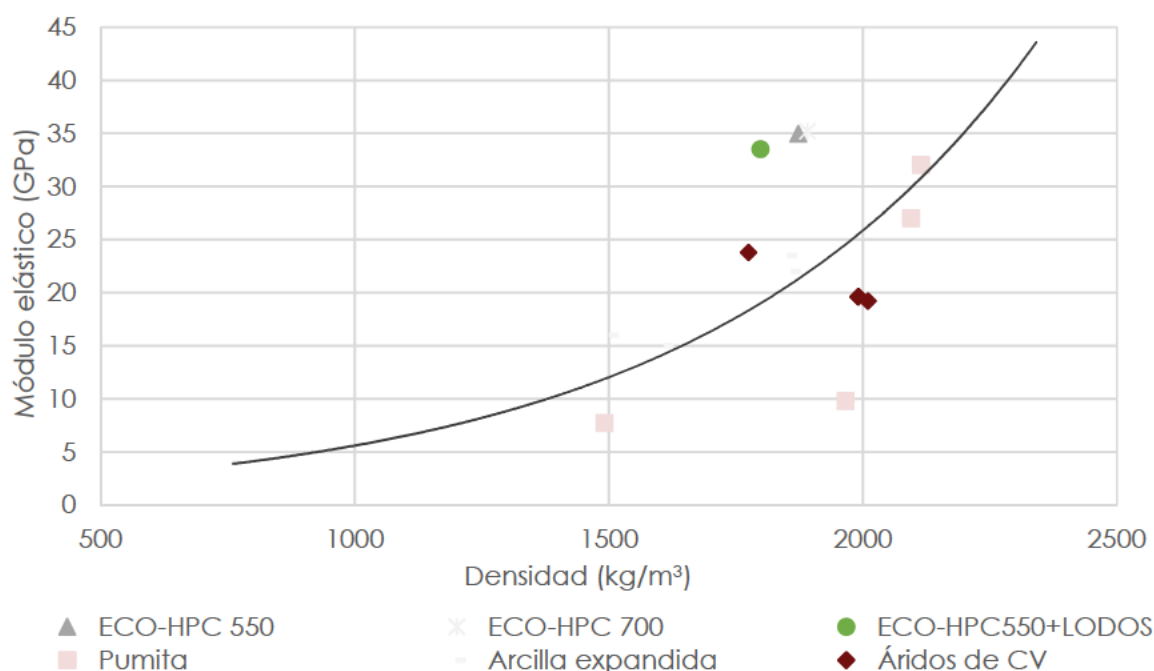


Figura 107 - Valores de módulo de elasticidad- densidad de laboratorio y estimados

La **Figura 108** muestra la relación módulo-densidad de los ECO-HPC con otros hormigones ligeros estructurales. Estos, aunque están dentro de la nube de puntos, muestran una tendencia ascendente, es decir, el módulo elástico de los ECO-HPC, dentro de lo normal, es más alto que el del conjunto. Esto puede deberse a la rigidez proporcionada por el  $N_s$  al densificar la estructura porosa del hormigón.

Los hormigones analizados alcanzan altos valores de módulo elástico. Cuanto menos vacíos contenga el hormigón, mayor será su módulo [165]. La alta compacidad en la microestructura restringe el movimiento de la retracción en el hormigón que causa una alta tensión interna, estas presiones son el origen de los altos valores del módulo elástico.



**Figura 108** - Relación Módulo-Densidad de hormigones del estado del arte y ECO-HPC

El módulo elástico es una característica del hormigón que está relacionada con la resistencia, la retracción y la microestructura. Neville [166] aseguró que los hormigones ligeros se usan para soportar una gran retracción debido a su bajo módulo elástico y la proporción sustancial de árido fino que origina muchos vacíos. Se ha encontrado tanta relación entre la retracción y el módulo que Reichard [167] propuso una correlación entre ambos, esta correlación no es válida para los hormigones ligeros, pero nos da una idea de que a bajo módulo debemos esperar grandes retracciones. En esta línea, Li y Li [168] investigaron esto y propusieron un modelo para determinar la retracción autógena del hormigón autocompactante basándose en conocer el diámetro capilar crítico, el coeficiente de Poisson y el módulo elástico. Este hecho también es observado por Beushausen y Gillmer [165], quienes obtienen valores similares a los LWC de esta investigación, en sus morteros con una relación a/cm baja, tanto en el módulo elástico como en la retracción

#### 5E2D. TRACCIÓN INDIRECTA

La resistencia a tracción es una característica muy relacionada con la compresión por lo que normativas como la española EHE-08 [104] o el Código Modelo FIB 2010 [164], dan formulaciones para poder estimar los valores de la tracción a partir de la compresión, en esta formulación se aportan los datos para estimar la resistencia media a tracción y la resistencia característica inferior a tracción, siendo esta última la utilizada de base para el cálculo estructural.

En la **Figura 109** se relacionan los datos tracción-compresión que a su vez se comparan con los estimados según la formulación de del código modelo. Los datos de laboratorio confirman como válidos los estimados de la norma ya que se encuentran en el rango de los esperados siendo el valor de cálculo ligeramente inferior al de ensayo.

Dicha formulación es la siguiente:

Para la resistencia a tracción, la EHE-08 (2009), especifica el ensayo brasileño para su determinación (el realizado en ensayos del presente trabajo). El dato obtenido será la  $f_{ct}$ , a partir de ella, se puede obtener la resistencia a rotura por tracción indirecta, mediante la siguiente expresión:

$$f_{ct} = 0.90 f_{ci}$$

El valor de la resistencia media a tracción  $f_{ct,m}$  puede estimarse, a falta de resultados de ensayos, mediante:

- Para LWC con Resistencia a compresión ( $f_{ck}$ )  $\leq 50$  MPa

$$f_{ct,m} = 0.30 f_{ck}^{2/3} \times (0.4 + 0.6 \times \rho / 2200)$$

- Para NC con resistencias ( $f_{ck}$ )  $> 50$  MPa

$$f_{ct,m} = 2.2 \cdot \ln(1 + 0.1 \cdot (f_{ck} + 8))$$

donde  $f_{ck}$  es la resistencia a la compresión característica y  $\rho$  la densidad de secado en horno del LWC en kg/m<sup>3</sup>

Los valores de los límites inferiores y superiores se pueden estimar usando las siguientes ecuaciones, respectivamente:

$$f_{ct,k \max} = 1.3 f_{ct,m}$$

$$f_{ct,k \min} = 0.7 f_{ct,m}$$

La **Figura 110** expone la relación entre las resistencias a tracción y compresión de los hormigones ligeros analizados y se observa como esta relación es directa por lo que la discusión de los resultados será la misma que para la compresión, los datos son los que se pedían como objetivo, hormigones ligeros con valores resistentes como los de los LWA tradicionales, pero con LWA.

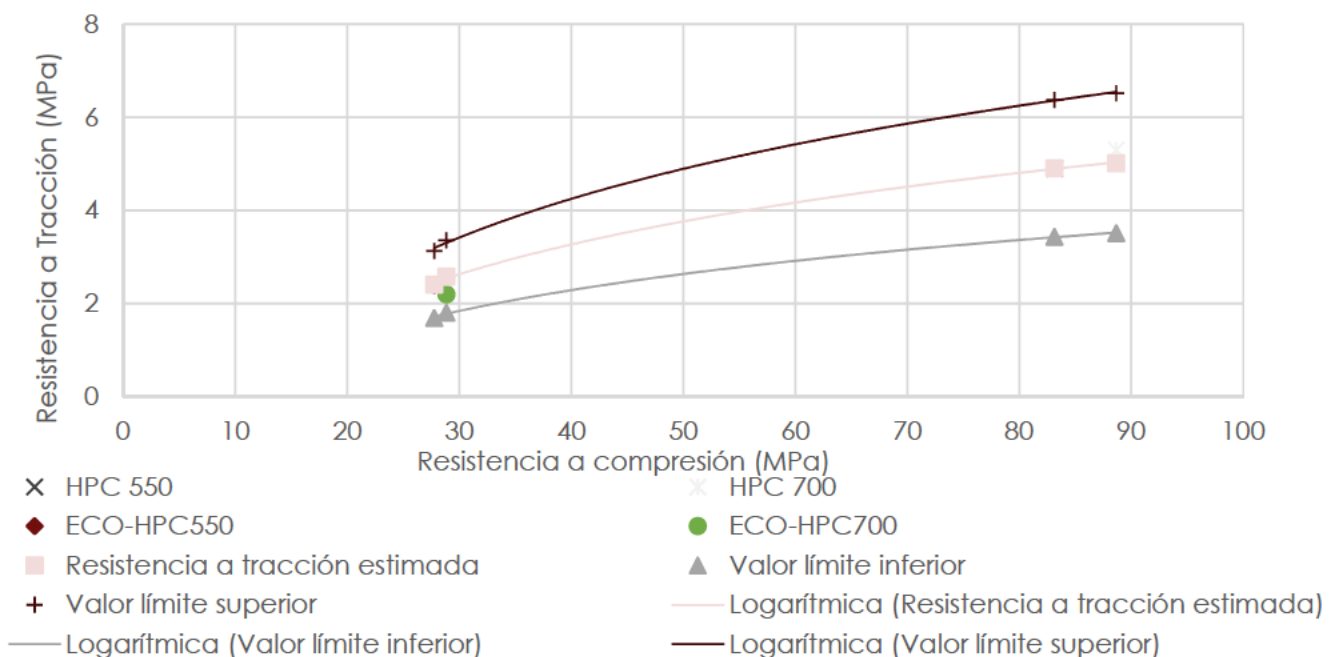


Figura 109 – Relación Tracción –comp. comparados con datos estimados según FIB-Code 2010



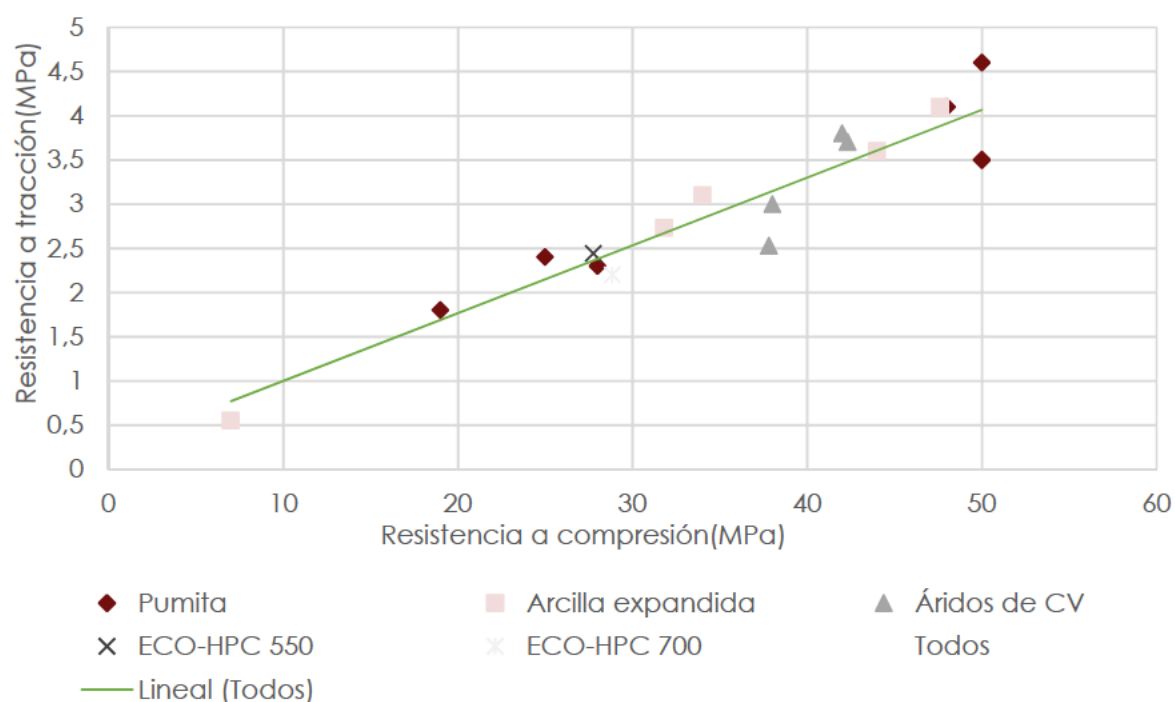


Figura 110 – Relación tracción–resistencia a compresión, estado del arte y ECO-HPC

### 5E3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS ENSAYOS DE ESTABILIDAD DIMENSIONAL

#### 5E3A. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS HORMIGONES DURANTE EL FRAGUADO.

El estudio de la temperatura durante las primeras horas de fraguado ofrece información sobre las tensiones que se pueden producir por la retracción térmica asociado a numerosas patologías del hormigón.

En la **Figura 111** se muestran los resultados del ensayo.

Las cuatro dosificaciones muestran evoluciones similares de la temperatura a lo largo del tiempo, sin alcanzar ninguno de ellos temperaturas elevadas. La temperatura máxima la alcanzan todos a las 6 horas de fraguado. Los hormigones HPC presentan comportamientos muy similares pese a la diferencia en la dosificación del cemento, esto es debido, en parte al pequeño tamaño de la pieza, y a los materiales, tanto por la composición del cemento como de los áridos, aun así, los hormigones que menos temperatura alcanzan son los que cuentan con 550 kg/m<sup>3</sup> de cemento que alcanzan la misma temperatura máxima siendo en este caso despreciable el hecho de la inercia térmica que tienen los LWA, muy superior a la de los convencionales. En el caso de los hormigones con más alto contenido en cemento este comportamiento sí es más visible al alcanzar más lentamente la temperatura ambiente que el HP 700 cuya curva de bajada es mucho más pronunciada, pese a ello el ECO-HP alcanza medio grado más que su correspondiente no ligero HP 700. A partir de las 21 horas todos los hormigones estaban en el rango de la temperatura ambiente.

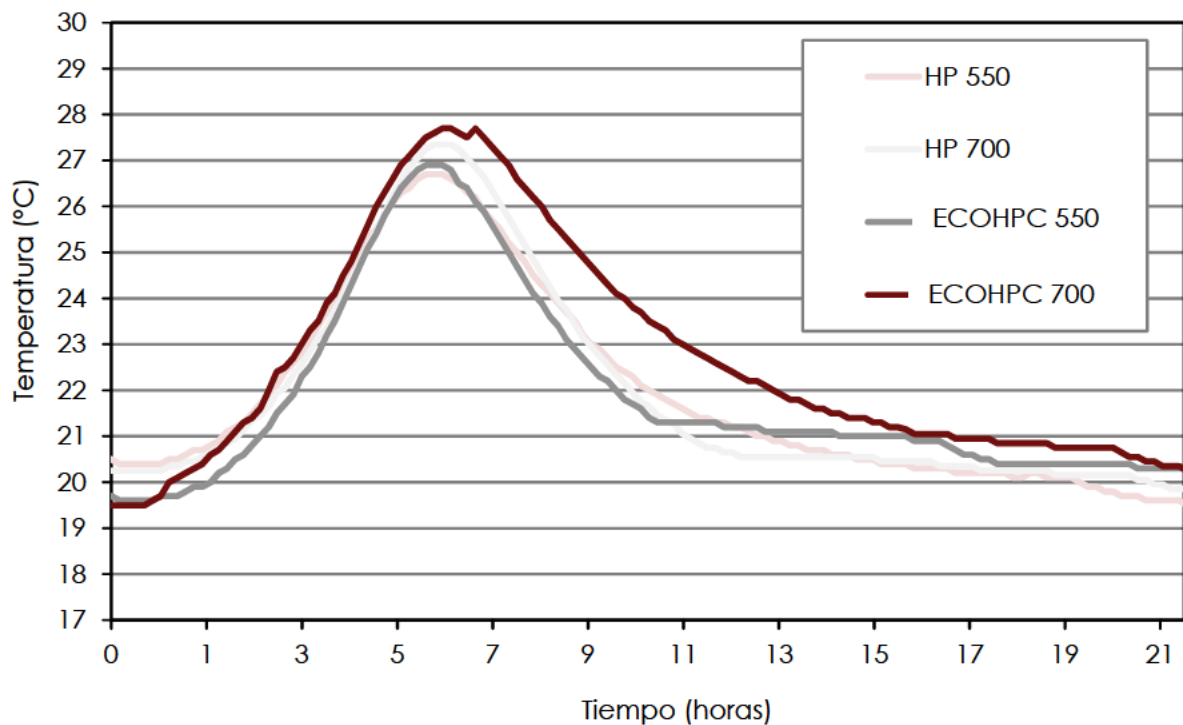


Figura 111 - Evolución de la temperatura de fraguado (°C) para cada dosificación

### 5E3B. RETRACCIÓN

Las dosificaciones anteriores fueron ensayadas para observar cómo afecta en la retracción del hormigón la sustitución de árido convencional por árido ligero. Los resultados de la prueba se muestran en la **Figura 112**.

La retracción en hormigón convencional, a los 60 días, oscila entre 200µm y 800µm [98]. Los hormigones de este trabajo presentan a 60 días, entre 650 y 750µm, tanto los hormigones ligeros como HPC. Estos valores, aunque elevados, están dentro del rango normal, destacando la ausencia de diferencias significativas entre LWC y HPC.

El que los valores sean altos se explica por el alto contenido en cemento. Wu, et al. [169], en su revisión de la retracción autógena en HPC, enumeraron los factores que afectan a la retracción. Entre los que lo aumentan hay una baja relación  $a/cm$  o un alto módulo de elasticidad. Entre aquellos que lo reducen, el uso de CV, o el de LWA. En relación al cociente  $a/cm$ , existe un consenso sobre que una relación baja con un alto contenido de cemento, puede inducir una mayor retracción autógena, ya que el agua de endurecimiento no puede acceder a los poros más pequeños y produce un secado interno denominado auto-secado [170, 171]. Por otro lado, como ya se mencionó en el punto anterior, un alto módulo de elasticidad, como es este caso, limita la retracción. Kayali et al. [60] en su estudio sobre la retracción por secado de LWC con fibras y CV producen un hormigón con proporciones de cemento similares a las analizadas en este documento (785 y 550 kg/m³), así como la relación  $a/cm$  (0.23). Los altos valores de retracción que obtienen se justifican por el

gran contenido de pasta de cemento, concluyendo sobre la importancia de tener en cuenta el LWA para un posible modelo de predicción de retracción.

El reducido impacto del LWA en las mezclas, puede deberse a que los estudios que estudian la retracción de los LWC, y que afirman que los LWA la reducen, utilizan áridos muy porosos y absorbentes, caso muy diferente al de esta investigación.

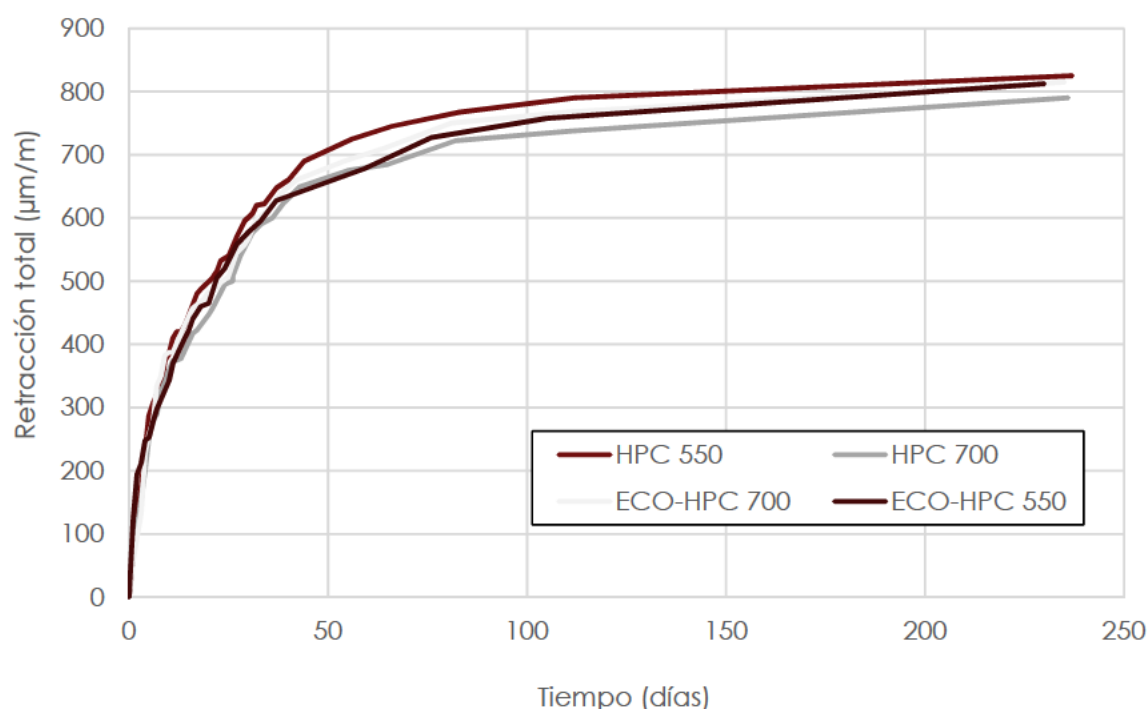


Figura 112- Evolución de las retracciones totales para cada dosificación

Respecto al impacto del uso del Ns, algunos estudios afirman que un alto contenido en Ns supone elevar la retracción [72, 172]. Esto se debe a que al aumentar el número de nanopartículas, el cristal de  $\text{Ac}(\text{OH})_2$  no puede crecer, y su cantidad se reduce, lo que también reduce la proporción de cristales de gel de C-S-H. Por otro lado, Sonebi, et al. [173] afirman en su estudio de morteros con Ns, CV y SP que, con una mayor cantidad de Ns, los morteros sufren menos retracción plástica. Este hecho puede estar relacionado con el efecto de relleno de las partículas de Ns y su impacto sobre la cinética de hidratación del cemento. A medida que la matriz cementosa se densifica por partículas de Ns, éstas contribuyen a restringir los cambios de volumen debido a la retracción plástica. En el mismo documento, observan que un menor porcentaje de CV conduce a una menor retracción plástica. También estudiaron la retracción por secado, en donde estos efectos fueron similares, aunque menos obvios.

Con todo esto se puede concluir que, la elevada cantidad de cemento debería provocar una mayor retracción de las mezclas, sin embargo, en este caso la alta cantidad de cemento actúa como fino, así como el Ns, compactando el hormigón, incluso el ligero, de forma que impide la retracción del material provocando tensiones internas que llevan a un alto módulo de elasticidad.

## 5E4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS ENSAYOS DE DURABILIDAD

### 5E4A. POROSIMETRÍA POR INTRUSIÓN DE MERCURIO (PIM)

Los poros de los materiales con base de cemento se pueden agrupar en 3 tipos, poros de gel o microporos, menores de  $0.003\mu\text{m}$ ; Los poros capilares, entre  $0.01\mu\text{m}$  y  $1\mu\text{m}$ ; y poros o macro poros entre  $50\mu\text{m}$  y  $1000\mu\text{m}$  [174]. Los poros de gel están relacionados con la retracción, mientras que los poros capilares influyen en la resistencia y la elasticidad [175-177].

Analizando de la influencia de la sustitución del árido tradicional por el ligero, el ECO-HPC 700 aumenta su porosidad en un 25% en comparación con su equivalente con el árido tradicional, el HPC700. El ECO-HPC 550 tiene un 37% más de porosidad que el HPC 550.

La **Tabla 78** muestra los resultados de MIP. Se observa que, la porosidad del ECO-HPC es mayor que la del HPC y ambas HPC tienen porosidades estadísticamente iguales. La porosidad del ECO-HPC 550 es un 24% más alta que la del ECO-HPC 700. En la banda de porosidad capilar, el ECO-HPC 550 es un 30% mayor que el ECO-HPC 700 y el HPC550 es un 18% más que el HPC700.

**Tabla 78** - Resultados del ensayo de PIM

	HPC 550	HPC 700	ECO-HPC 550	ECO-HPC 700
Porosidad Total (%)	9,830	9,732	13,408	11,17
Radio promedio de poros ( $\mu\text{m}$ )	226,7	254	295,1	267
Porosidad en rango capilar (%)	5,106	4,2	8,116	5,643
Porosidad inferior al rango capilar (%)	0,729	0,555	1,637	0,877

La **Figura 113** muestra la distribución dimensional del tamaño de poro. Se observa que el HPC solo tiene porosidad en diámetros de poro superiores a  $0.070\mu\text{m}$ , donde aumenta bruscamente a  $0.050\mu\text{m}$  para descender al diámetro de  $0.030\mu\text{m}$  desde donde tiene una baja porosidad constante. Las líneas de ambos HPC se superponen para que no tengan diferencias sustanciales en sus rangos de porosidad, esto lleva a pensar que, en lo que se refiere a la porosidad total, la cantidad de cemento o Ns no afecta.

Por otro lado, los LWC tienen 3 picos, en los diámetros de  $6\mu\text{m}$ ,  $0.5\mu\text{m}$  y  $0.045\mu\text{m}$ , los dos últimos dentro del rango de porosidad capilar y el último es el más pronunciado de los 3, la principal diferencia está en los poros. debajo del pico de  $0.045\mu\text{m}$ , el ECOHPC550 tiene más porosidad en este pico y desciende más lentamente que el ECO HPC700 manteniendo de estos niveles una porosidad siempre mayor. Por lo tanto, en LWC, con áridos de plástico y corcho, con sustitución del 50% de los áridos tradicionales, el aumento de la cantidad de cemento y Ns reduce la porosidad por debajo de los diámetros de poro de  $0.045\mu\text{m}$ , debido a la mejora en el ITZ entre árido ligero/aglutinante, un hecho que no afecta la ITZ entre el árido natural y aglutinante.



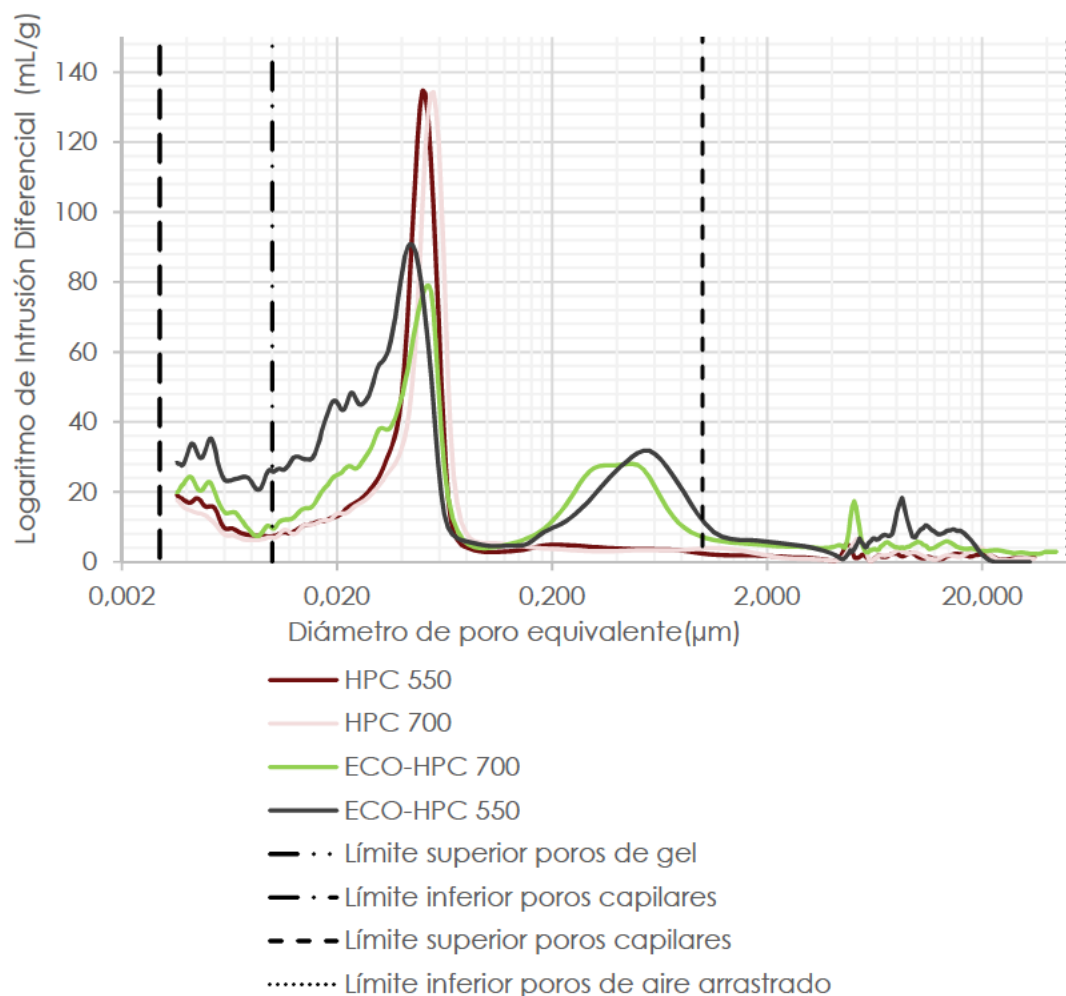


Figura 113 – Distribución dimensional de los poros de las muestras

La **Figura 114** sitúa los hormigones estudiados junto con otros en la literatura científica, se observa que las porosidades se encuentran entre las más bajas. De estos artículos, cabe destacar el de Bermejo Núñez, et al. [154], que compara hormigones utilizando diferentes SCM (puzolanas y escorias) obteniendo en las mezclas con curvas SCM similares a los LWC del presente trabajo y en la mezcla con solo cemento, la curva es similar a las HPC. Los autores atribuyen este hecho el peor rendimiento en la durabilidad de las mezclas con puzolanas.

Se ha comentado la relación entre la porosidad capilar, la elasticidad y la retracción, en esta prueba se observa cómo la porosidad del HPC es muy baja, tanto en la porosidad capilar como en el total. El diámetro capilar crítico está directamente relacionado con la retracción y el módulo elástico, por lo que Li y Li [168] determinan un modelo para predecir la retracción donde tanto el módulo como el diámetro capilar crítico son inversamente proporcionales a la retracción esperada. Estos datos, como hemos visto, están relacionados porque la alta compactación, o baja porosidad, es lo que conduce a las tensiones internas que causan los altos valores de módulo elástico



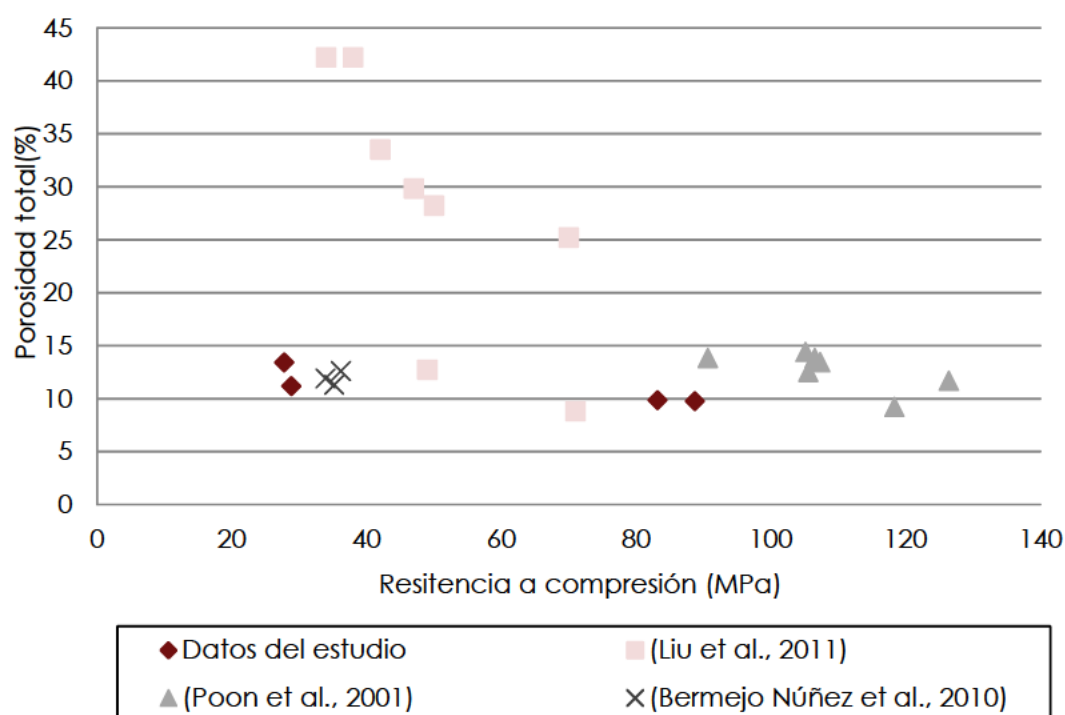


Figura 114 - Situación de los hormigones ensayados frente al estado del arte en la relación porosidad- resistencia a compresión.

#### 5E4B. ABSORCIÓN DE AGUA POR CAPILARIDAD

La absorción por capilaridad es otra forma de analizar la porosidad accesible de los hormigones, se trata de sumergir una de las caras de las probetas y pesar diariamente hasta la saturación, el ensayo es muy similar al de sortividad donde los datos relevantes, además de las pesadas diarias, son la absorción del hormigón a las 6 horas y a las 24 (sortividad inicial y secundaria) en este trabajo se analizarán los hormigones bajo las dos formulaciones.

La **Tabla 79** muestra resultados según la formulación del ensayo de capilaridad. La porosidad más alta es la del HPC 550 con lodos de papel calcinados. El resto de los hormigones tienen una porosidad similar, aunque en este ensayo sí que mejora la alta cantidad de cemento tanto para el LWC como el de altas prestaciones. La **Tabla 80**, y la **Tabla 81**, muestran resultados de la formulación de sortividad.

Tabla 79 – Resultados de ensayo de capilaridad

	Porosidad $\epsilon_c$ (g/cm <sup>3</sup> )	Resistencia a la penetración de agua m (min/cm <sup>2</sup> )	Cociente de absorción capilar K (kg/m <sup>2</sup> mm <sup>0.5</sup> )
HP 550	0,01340	273,33	8,110E-05
HP 700	0,01217	247,66	7,763E-05
EOHPC 700	0,01417	236,96	9,320E-05
EOHPC 550	0,01667	263,55	1,027E-04
HPC 550 + LODO	0,01817	269,49	1,11E-04
EOHPC 500 + LODO	0,01274	259,90	7,90E-05

Tabla 80 – Resultados ensayo sortividad

	$I=(W2-W1) / A*d \text{ (mm)}$					
	HPC 550	HPC 700	ECO HPC550	ECO HPC 700	HPC 550 + LODO	ECO HPC 550 + LODO
5 min	0,2190	0,2168	0,2562	0,2094	0,2773	0,1762
10 min	0,2467	0,2668	0,3091	0,2597	0,2884	0,2038
15min	0,2938	0,3112	0,3230	0,2764	0,3162	0,2258
30min	0,3465	0,3307	0,3342	0,2988	0,3438	0,2478
1 hora	0,3908	0,3863	0,3982	0,3546	0,3882	0,2644
2 horas	0,4490	0,4335	0,4511	0,4021	0,4437	0,2809
3 horas	0,4740	0,4613	0,4901	0,4467	0,4715	0,2919
4 horas	0,5072	0,4863	0,5235	0,4747	0,4991	0,3029
6 horas	0,5820	0,5224	0,5792	0,5193	0,5269	0,3305
1 día (24 horas)	0,6846	0,6364	0,7965	0,6980	1,2083	0,4461
2 días (48 horas)	0,7539	0,7059	0,9301	0,8125	1,3527	0,5232
3 días (72 horas)	0,8315	0,7725	1,0359	0,8879	1,4915	0,5893
6 días	0,8842	0,8309	1,1529	0,9549	1,6525	0,7060
7 días	0,9313	0,8642	1,2364	1,0247	1,6747	0,7435
8 días	0,9396	0,8837	1,2420	1,0582	1,7136	0,7711
10 días	0,9756	0,8837	1,2559	1,0610	1,7746	0,8482
13 días	1,0338	0,9170	1,3423	1,1196	1,8191	0,9143
14 días		0,9949	1,5010	1,2397	1,8524	0,9363
15 días					1,8579	0,9473
16 días					1,8912	

Tabla 81 – Resultados sortividad

	S Inicial (mm/s <sup>2</sup> )	S secundaria (mm/s <sup>2</sup> )
HPC 550	3,55E-03	2,20E-03
HPC 700	3,55E-03	2,16E-03
ECO HPC 700	3,53E-03	2,37E-03
ECO HPC 550	3,94E-03	2,71E-03
HPC 550 + LODO	3,59E-03	4,11E-03
ECO HPC 550 + LODO	2,25E-03	2,37E-03

La **Figura 115** muestra los datos de absorción de agua en función del tiempo, distinguiendo entre absorción inicial, hasta las 6 horas y secundaria después de 24 horas. Como se observa en la tabla 2, la absorción durante las primeras horas de las seis mezclas es muy similar y las diferencias son observables a partir de las 24 horas. Los hormigones HPC tienen niveles de sorptividad muy similares en las primeras fases de la sorptividad secundaria y estos aumentan con el tiempo. Las diferencias entre los LWC son más constantes a lo largo del tiempo y las diferencias en la absorción de LWC son un 57% más altas que las diferencias entre HPC, esto puede deberse a que niveles elevados de cemento y  $N_s$  en HPC significan que el agua se absorbe más lentamente con el tiempo.

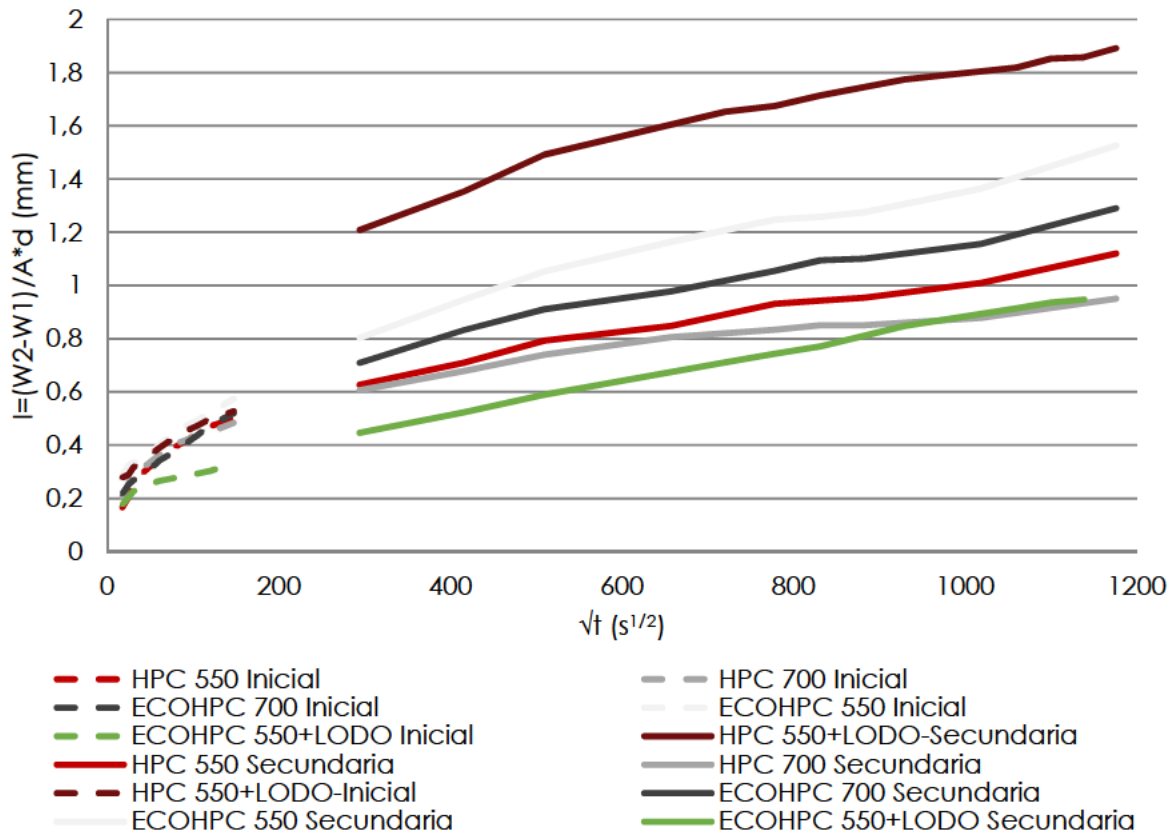


Figura 115– Absorción de agua Inicial y secundaria Vs. Raíz del tiempo

En sorptividad inicial, los datos son muy similares, siendo el ECO HPC 550 el que refleja niveles de absorción más altos. En la clasificación secundaria, los datos reflejan más diferencias entre ellos y resultados muy similares a los de la porosimetría por MIP, el HPC 700 es estadísticamente igual (2% de diferencia), a HPC 550.

Los LWC absorben más agua, la diferencia entre el ECO HPC 700 y 550 es mayor que en el HPC (12%). La influencia de la sustitución de los áridos naturales por los ligeros es baja en el caso de HPC 700 y ECO HPC 700, el HPC absorbe un 9% menos que el LWC. En el hormigón con 550 de cemento, es mayor, el HPC 550 tiene una sorptividad secundaria 19% menor que el ECO HPC 550. Estos datos confirman los de la porosimetría y verifican que, de hecho, los poros se encuentran en los límites de la porosidad capilar están directamente relacionados con la absorción de agua por capilaridad.

En la **Figura 116** se puede ver la relación sorptividad -resistencia a compresión del presente trabajo en comparación con otros estudios. Du, Du y Liu [178] analizan en su estudio el efecto del  $N_s$  en varias propiedades de LWC. Concluyen que, el  $N_s$  en un hormigón con cemento tipo I, mejora la resistencia a la compresión, la capacidad de absorción, la penetración del agua, la porosidad y el ataque con cloruros. Nibudey, et al. [179], estudia la resistencia a la compresión y la sorptividad del hormigón con fibras de plástico recicladas. Karahan, et al. [180] analizan el efecto del metakaolin en el hormigón autocompactante, siendo este efecto positivo, y Panesar [181] produce LWC con diferentes tipos de agentes espumantes y analiza sus efectos.

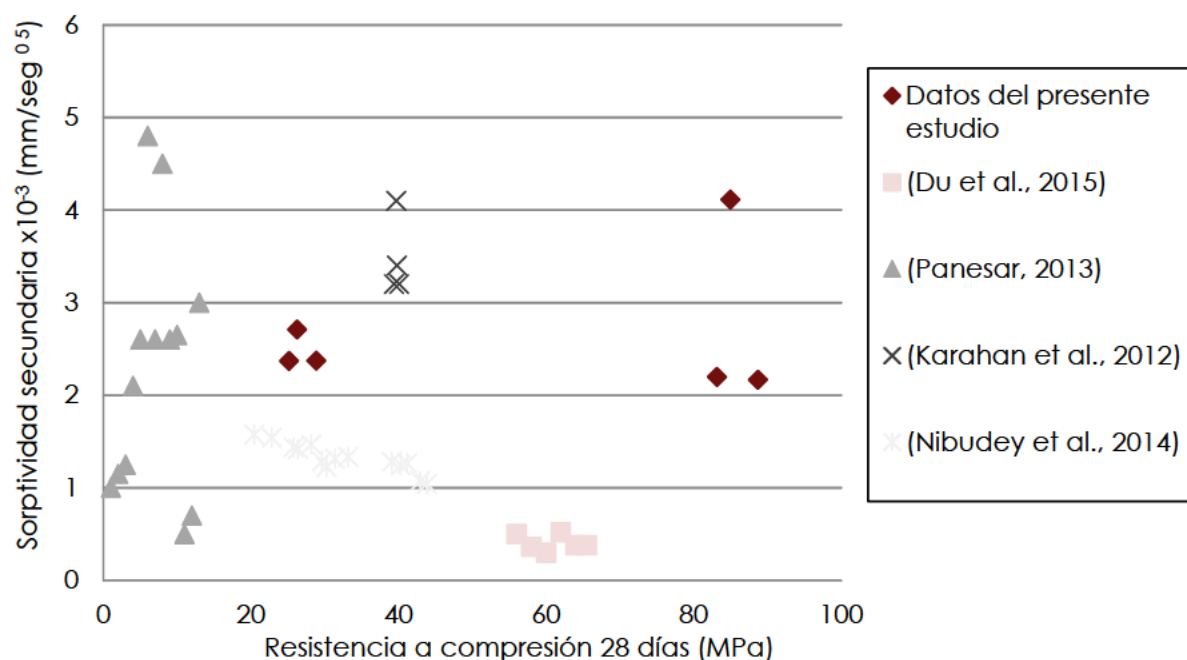


Figura 116 – Sorptividad secundaria en relación con la resistencia a compresión

En la **Tabla 82** se comparan los resultados de las porosidades según PIM y capilaridad. Confirmando que la porosidad más alta es la del ECO-HPC 550 seguido del ECO-HPC 700. Con relación a los HPC, en ambos los valores son muy bajos, los valores más altos de los ECO-HPC lo son comparados con los no ligeros, pero por debajo de otros hormigones ligeros con áridos más comunes y no sostenibles.

Los bajos valores de estos ensayos se pueden justificar por el uso del Ns, así como por una distribución granulométrica muy ajustada que propicia una alta compacidad. Este hecho confirma los resultados anteriores.

Tabla 82 – Resultados de porosidad por PIM y capilaridad

	Porosidad Total (%)	Porosidad $\epsilon_c$ (g/cm <sup>3</sup> )
HPC 550	9,8308	0,01340
HPC 700	10,0182	0,01217
ECO-HPC 550	17,7574	0,01667
ECO-HPC 700	11,8472	0,01417

#### 5E4C. PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE AGUA A PRESIÓN

Los resultados de la prueba se muestran en la **Tabla 84** y los resultados en la **Tabla 83**. Al igual que en las pruebas PIM y las de sorptividad, los resultados muestran que la HPC 700 muestra un mejor rendimiento dada su menor porosidad. Por otro lado, la HPC 550 sufre la misma penetración que su equivalente en LWC. En LWC, el ECO HPC 700 tiene valores de penetración de agua más altos que el ECO HPC 550. Este hecho lleva a pensar que existe una relación entre la densidad y la penetración del agua.

En cualquier caso, a pesar de las diferencias obtenidas, los valores de penetración son mucho más bajos que la máxima permitida por las normas. La norma española EHE-08 requiere, frente a exposiciones ambientales agresivas, cumplir con las especificaciones para la prueba de penetración de agua, y estas son, para el caso de exposición más agresiva, 50 mm de profundidad máxima y 20 mm de profundidad promedio, 54% más del hormigón con más penetración de los analizados. Esto implica que, aunque algunos valores no se corresponden directamente con las pruebas de absorción y PIM, son tan bajos que las diferencias entre los cuatro hormigones son mínimas y todas tienen valores marcadamente bajos.

**Tabla 83** - Valores del ensayo de penetración de agua a presión, con los datos de resistencia a compresión y densidad

Tipo de hormigón	Resistencia a compresión 90 Días (MPa)	Profundidad media de penetración de agua a presión (mm)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
HPC 550	96.96	7.9	2303.71
HPC 700	102.57	5.5	2329.66
ECO HPC 550	30.19	7.5	1860.34
ECO HPC 700	32.61	9.2	1872.05

La **Figura 117** confirma este hecho donde los valores obtenidos en esta prueba (penetración promedio) se muestran junto con otros en la literatura científica.

Los resultados de la prueba coinciden con los obtenidos por Liu, Chia y Zhang [19] que desarrollan LWC con alta resistencia a la penetración de agua y cloruros y obtienen hormigón con penetraciones tan bajas como las del presente estudio, para esto diseñan una mezcla con 600kg/m<sup>3</sup> de cemento, superior a los 500 que usan en el resto de mezclas y HS que no se utiliza en el resto, además de una cuidadosa granulometría, diferentes LWA, entre ellos el vidrio expandido. En ambos casos, el alto contenido de cemento coincide, el uso de SCM con silicio y la combinación de varios tipos de árido.

Ji [70] también señala que los hormigones con Ns tienen una profundidad de penetración de agua un 55% menor que la que no lo contiene y el análisis de su microestructura justifica esta mejora ya que los Ns absorben cristales de Ca(OH)<sub>2</sub> reduciendo su cantidad lo que densifica la zona intersticial, Además, puede llenar los huecos de gel CSH.

El alto contenido de cemento y la presencia de Ns explican, por lo tanto, los niveles reducidos de penetración de las muestras, mientras que el bajo acceso a la



porosidad debido a su tortuosidad explica las diferencias con las pruebas de porosidad.

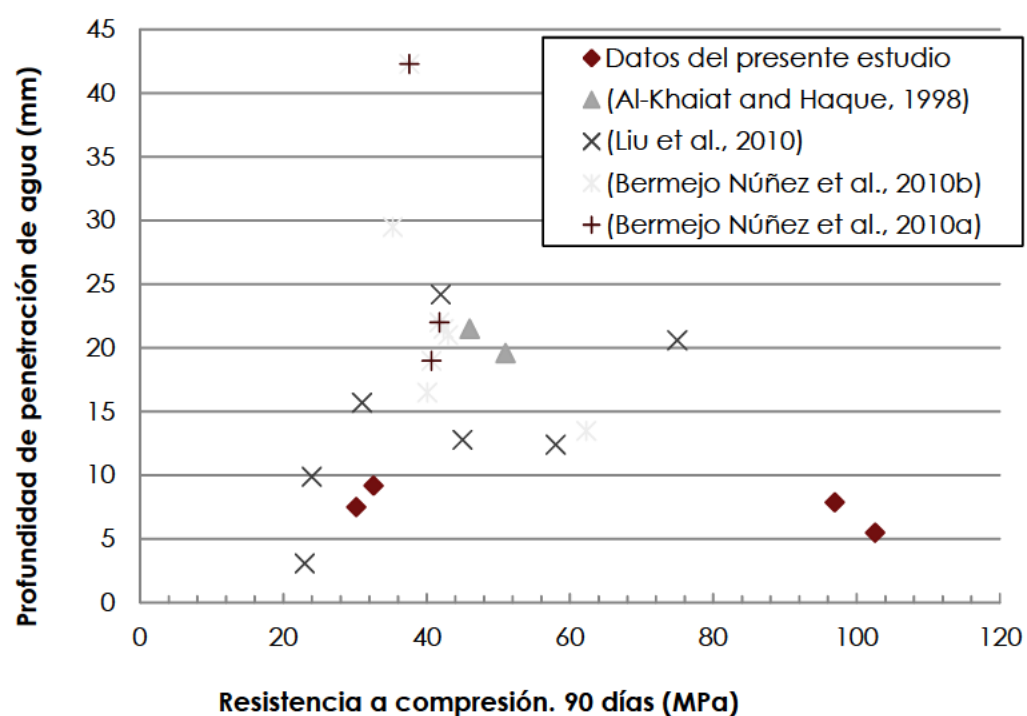


Figura 117 - Estado del arte de penetración de agua a presión Vs. Resistencia a compresión.

Tabla 84 – Datos del experimento de resistencia a la penetración de agua a presión

	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8	h9	h10	h11	h12	h13	h14	h15	h16	h media	h max	Sup mm2
HPC 550a	3	3	3	3	5	18	8	4	4	3	3	3	3	3	3		5	18	570
	5	5	4	3	2	1	4	6	6	15	7	5	5	5	5		5,3	15	585
	Sup	30	30	30	40	115	130	60	40	35	30	30	30	30	30	30	5,1	16,5	578
	Sup	50	45	35	25	15	25	50	60	105	110	60	50	50	50	40			
HPC 550b	3	4	5	5	8	8	10	11	10	14	13	10	7	5	3		8,8	14	1010
	5	7	5	7	8	11	11	11	18	14	21	20	14	8	5		12,3	21	1415
	Sup	35	45	50	65	80	90	105	105	120	135	115	85	60	40	25	10,6	17,5	1213
	Sup	60	60	60	75	95	110	110	145	160	175	205	170	110	65	40			
HPC7 00a	0	3	5	5	5	7	8	5	5	5	5	5	5	4	3		5,3	8	595
	3	3	3	3	3	6	12	10	15	16	5	3	3	3	3		6,8	16	790
	Sup	15	40	50	50	60	75	65	50	50	50	50	50	45	35	25	6,1	12,0	693
	Sup	30	30	30	30	45	90	110	125	155	105	40	30	30	30	30			
HPC7 00b	6	6	5	4	10	10	5	3	3	3	3	3	3	3	3		4,6	10	510
	3	5	5	4	6	5	5	3	3	3	5	7	10	8	8		5,3	10	575
	Sup	60	55	45	70	100	75	40	30	30	30	30	30	30	30	30	5,0	10,0	543
	Sup	40	50	45	50	55	50	40	30	30	40	60	85	90	80	55			
ECOHP 550a	0	0	5	6	6	6	5	7	6	7	9	14	15	9	5		7,9	15	880
	7	7	8	10	10	10	5	6	5	6	7	13	14	10	9		8,7	14	950
	0	2	6	8	8	7	5	7	9	9	9	6	7	4	4		7,1	9	800
	0	5	7	6	5	5	9	10	10	7	6	5	5	5	3		6,7	10	740
	Sup	0	25	55	60	60	55	60	65	65	80	115	145	120	70	25	7,6	12,0	843
	Sup	70	75	90	100	100	75	55	55	55	65	100	135	120	95	90			
	Sup	10	40	70	80	75	60	60	80	90	90	75	65	55	40	35			
	Sup	25	60	65	55	50	70	95	100	85	65	55	50	50	40	30			
ECOHP	6	7	7	7	7	7	8	10	9	7	8	9	8	10	9		8,1	10	885

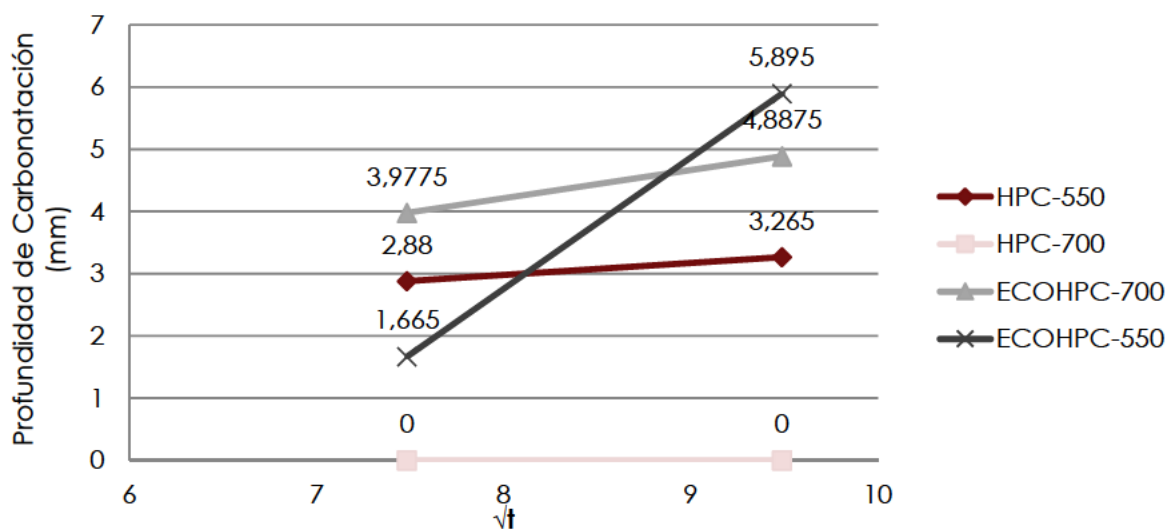
HORMIGÓN LIGERO CON NANOSÍLICE Y ÁRIDOS DE PLÁSTICO Y CORCHO RECICLADOS

PC 550b	6	9	10	12	12	9	8	8	8	7	5	7	7	5	5		8,2	12	905
	2	5	7	9	9	8	7	6	5	8	7	11	10	5	5		7,7	11	860
	3	5	7	11	10	5	5	4	4	5	4	5	6	6	8		6	11	655
	Sup	65	70	70	70	70	75	90	95	80	75	85	85	90	95	70	7,5	11,0	826
	Sup	75	95	110	120	105	85	80	80	75	60	60	70	60	50	45			
	Sup	35	60	80	90	85	75	65	55	65	75	90	105	75	50	50			
PC 700a	5	5	7	10	13	11	12	10	12	13	9	8	7	6	5		9,8	13	1115
	9	9	9	8	8	8	15	12	10	12	12	10	8	7	12	5	9,9	15	1110
	3	3	10	14	13	12	12	10	10	11	13	12	11	10	10		11,5	14	1280
	7	10	10	10	8	8	8	14	13	12	10	10	10	10	10	0	10,3	14	1130
	Sup	50	60	85	115	120	115	110	110	125	110	85	75	65	55	40	10,4	14,0	1159
	Sup	90	90	85	80	80	115	135	110	110	120	110	90	75	95	135			
	Sup	30	65	120	135	125	120	110	100	105	120	125	115	105	100	90			
	Sup	85	100	100	90	80	80	110	135	125	110	100	100	100	100	100			
PC 700b	11	11	11	13	10	8	6	6	6	6	6	7	7	7	8	5	7,8	13	840
	10	10	9	8	10	10	9	9	10	7	7	9	6	5	4		8,3	10	920
	Sup	110	110	120	115	90	70	60	60	60	60	65	70	70	75	115	8,0	11,5	880
	Sup	100	95	85	90	100	95	90	95	85	70	80	75	55	45	35			

#### 5E4D. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN ACELERADA

Una de las principales razones del deterioro de las construcciones de hormigón es la carbonatación. La reacción del dióxido de carbono atmosférico ( $\text{CO}_2$ ) con los productos de la hidratación del cemento (como  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) forma carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Esta reacción da como resultado la reducción del pH del hormigón, de 12,6 a menos de 9, lo que puede destruir la capa pasivante de óxido que protege las armaduras de la corrosión [182, 183].

La **Tabla 85** muestra los resultados de los ensayos. La **Figura 118** muestra la profundidad de carbonatación de los hormigones objeto del estudio. Los valores alcanzados son muy bajos, llegando, en el caso de HPC 700 a no carbonatación después de 90 días en la cámara. Esto se explica por el hecho de que una vez que el  $\text{CO}_2$  entra en el hormigón, reacciona primero con el hidróxido de calcio disponible ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) en la red de poros y una vez que se agota, reacciona con el CSH [184]. Por lo tanto, la profundidad de carbonatación del hormigón está condicionada por la estructura porosa. Así, Valcuende y Parra [185] demostraron que cuanto más delgada y tortuosa es la estructura porosa, más lento es el proceso. Para los hormigones tratados en este trabajo, las pruebas de PIM, sorptividad y penetración de agua muestran muy baja porosidad en todas las mezclas.



**Figura 118-** Profundidad de carbonatación en el tiempo

La incorporación de Ns produce una pequeña reducción en el PH y el contenido de iones alcalinos en la estructura porosa del hormigón. Un pH alto y un contenido alcalino aceleran la reacción química de la carbonatación [186]. Además, el Ns aumenta la estabilidad química de los productos de hidratación del cemento, lo que también mejora su resistencia a la carbonatación [69]. Además, el modo de curado del hormigón influye. Los hormigones curados en una cámara húmeda generalmente presentan una carbonatación más alta que los curados en inmersión como el caso de los objeto de este estudio [187]. Posiblemente debido al ligero secado superficial necesario para transportar el agua al interior, lo que aumenta la porosidad capilar de la superficie de hormigón. La **Figura 119** muestra cómo las profundidades de carbonatación de los hormigones analizados se

encuentran en los rangos más bajos de los estudios analizados. En el trabajo de Shi, Xu y Zhou [188], hay hormigón con niveles similares a los analizados que tienen altas cantidades de cemento (550 kg/m<sup>3</sup>) y baja relación agua / cemento.

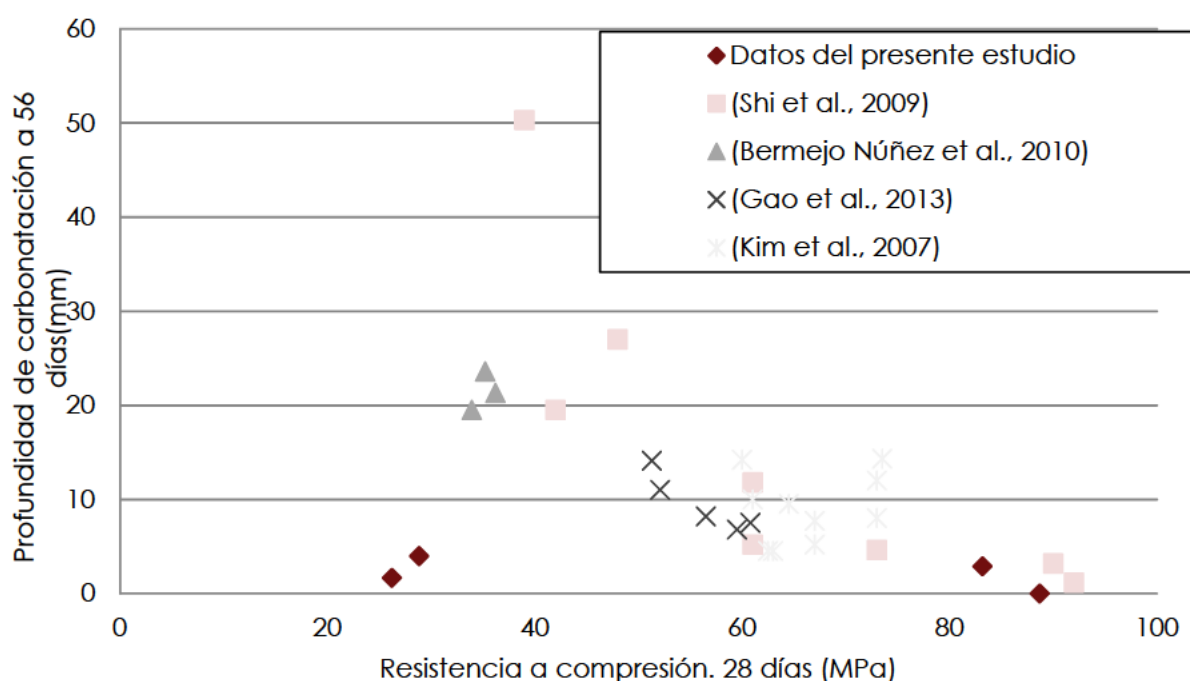


Figura 119- Profundidad de carbonatación Vs. Resistencia a compresión

Existe consenso sobre que a menor relación a/cm, menor carbonatación [18, 189], pero no sobre la influencia de la cantidad de cemento. Por lo tanto, Wassermann, Katz y Bentur [189] verificaron que el hormigón con diferentes cantidades de cemento pero con la misma relación a/cm, obtuvieron las mismas profundidades de carbonatación, sin embargo, al mantener la cantidad de cemento pero variando la relación a/cemento, efectivamente afectó a la carbonatación. Por otro lado, en este estudio la cantidad máxima de cemento utilizado fue de 450 kg/m<sup>3</sup> y en estudios con cantidades de cemento superiores a 500 kg/m<sup>3</sup> la penetración de la carbonatación es muy baja o directamente cero, este es el caso de [188] y otros [190-192]. En la literatura científica, por lo tanto, se observa que, una cantidad de cemento mayor a 500 kg/m<sup>3</sup> y una relación a/c > 0.4 conduce a una carbonatación muy baja o incluso cero. Las pruebas de carbonatación acelerada a los 56 y 90 días confirman este hecho.

Sobre la influencia de los áridos de plástico y corcho, Tragardh [193] o Tam, Gao y Tam [194], aseguran que el ITZ es el área más débil de compuestos cementosos. Por lo tanto, si los áridos tienen una ITZ resistente, la carbonatación será más alta. Así, para LWC, Rodhe y X-Betong. [195] compararon tres tipos de LWA obteniendo diferentes profundidades de carbonatación independientemente de la resistencia atribuida a la mejora en la estructura porosa de la ITZ. El uso de Ns, dada la mejora demostrada en la ITZ, es otro factor de mejora en la penetración de la carbonatación.



Tabla 85 – Resultados ensayo carbonatación acelerada

PROBETA	MEDIDA ENSAYO CARBONATACIÓN 56 DÍAS							MEDIDA ENSAYO CARBONATACIÓN 90 DÍAS							Profundidad de Carbonatación 56 días (mm)	Profundidad de Carbonatación 90 días (mm)	Mezcla
	CARA	1	2	3	4	5	MEDIA	CARA	1	2	3	4	5	MEDIA			
HPC-550 -A	A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,88	3,265	HPC-550
	B	0,0	0,0	0,0	6,7	10,4	3,4	B	0,0	0,0	0,0	7,7	12,3	4,0			
	C	6,6	7,0	7,3	11,3	9,9	8,4	C	7,0	7,2	7,5	12,0	10,5	8,8			
	D	12,4	3,3	4,4	0,0	0,0	4,0	D	13,6	4,3	4,2	2,0	1,0	5,0			
	MEDIA DE LAS CUATRO CARAS						4,0	MEDIA DE LAS CUATRO CARAS						4,5			
HPC-550-B	A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
	B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
	C	0,0	0,0	7,5	6,2	9,3	4,6	C	0,0	0,6	8,1	6,5	10,6	5,2			
	D	1,4	1,6	3,7	3,6	2,6	2,6	D	2,0	2,3	3,9	4,5	2,8	3,1			
	MEDIA DE LAS CUATRO CARAS						1,8	MEDIA DE LAS CUATRO CARAS						2,1			
HPC-700-A	A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	HPC-700
	B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
	C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
	D	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	D	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
	MEDIA DE LAS CUATRO CARAS						0,0	MEDIA DE LAS CUATRO CARAS						0,0			
HPC-700-B	A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
	B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
	C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
	D	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	D	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
	MEDIA DE LAS CUATRO CARAS						0,0	MEDIA DE LAS CUATRO CARAS						0,0			
ECOHP-700-A	A	13,7	8,9	9,5	5,6	4,0	8,3	A	15,6	10,5	10,6	6,6	4,2	9,5	3,9775	4,8875	ECOHP-700
	B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	B	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	0,2			
	C	6,2	4,9	6,0	7,3	6,0	6,1	C	8,6	5,6	7,2	7,3	7,1	7,2			

**HORMIGÓN** LIGERO CON NANOSÍLICE Y ÁRIDOS DE PLÁSTICO Y CORCHO RECICLADOS

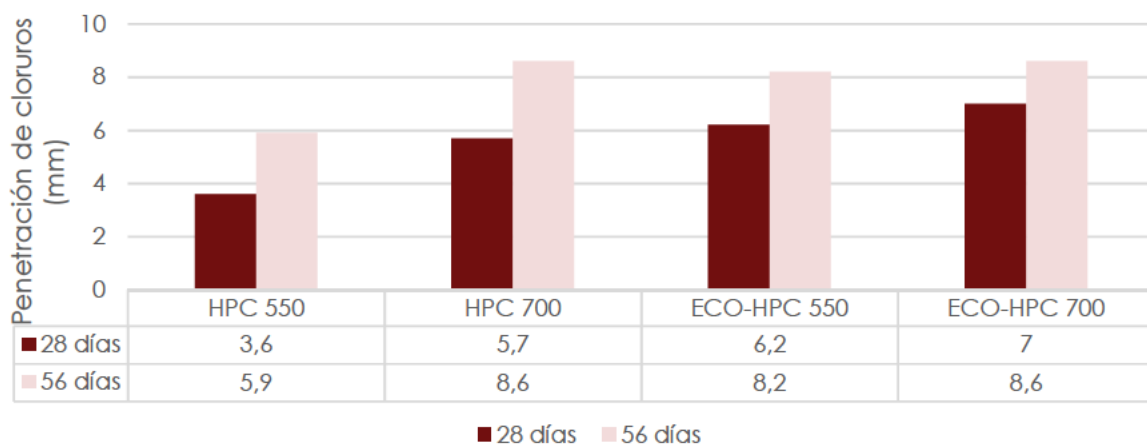
ECOHPC-700-B	D	5,4	0,5	6,2	5,7	3,6	4,3	D	7,8	1,6	7,3	6,6	3,5	5,4	1,665	5,895	ECOHPC-550
	MEDIA DE LAS CUATRO CARAS						4,7	MEDIA DE LAS CUATRO CARAS						5,6			
	A	11,8	7,8	8,1	9,0	4,3	8,2	A	12,6	8,9	8,6	9,5	5,5	9,0			
	B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
	C	7,9	4,8	0,0	0,0	0,0	2,5	C	8,8	5,6	2,0	1,5	0,0	3,6			
	D	0,0	0,0	0,0	4,1	7,8	2,4	D	0,0	0,0	6,6	5,6	9,0	4,2			
ECOHPC-550-A	MEDIA DE LAS CUATRO CARAS						3,3	MEDIA DE LAS CUATRO CARAS						4,2			
	A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
	B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
	C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
	D	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	D	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
ECOHPC-550-B	MEDIA DE LAS CUATRO CARAS						0,0	MEDIA DE LAS CUATRO CARAS						0,0			
	A	11,3	11,4	5,7	6,0	4,0	7,7	A	13,3	13,5	6,7	13,6	17,8	13,0			
	B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	B	16,5	7,2	2,2	7,8	14,1	9,6			
	C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	C	10,7	0,0	7,8	13,0	0,0	6,3			
	D	3,5	3,6	3,3	6,0	11,8	5,6	D	15,6	16,8	16,7	19,9	22,6	18,3			
MEDIA DE LAS CUATRO CARAS							3,3	MEDIA DE LAS CUATRO CARAS							11,8		

Se sacan de cámara humedad y se dejan en ambiente de laboratorio durante 5 días para que se estabilicen en humedad, posteriormente se meten en cámara climática en condiciones de ensayo (20°C+65%H+3%CO2)

#### 5E4E. PENETRACIÓN DE IONES CLORURO ACELERADA

Las muestras se rociaron con una solución de nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) para medir la penetración. La profundidad fue determinada por el color blanquecino debido a la precipitación del cloruro de plata. La concentración de cloruros necesaria para que se produzca el cambio de color es de 0.07 N en un hormigón con cemento Portland. De acuerdo con Otsuki, Nagataki y Nakashita [196], el cambio de color se vuelve visible cuando el contenido de cloruro supera el 0.15% del peso del cemento.

Los resultados de la prueba se muestran en la **Figura 120**, después de 28 y 56 días de exposición. Los cuatro hormigones tienen baja penetración, tres son estadísticamente similares y el HPC 550 es ligeramente más bajo que el resto. Esto es debido a la baja porosidad, que impide el avance del ataque con cloruros libres [19].



**Figura 120** – Resultados medios de penetración de ion cloruro en hormigones

Otros autores han estudiado mezclas en las que los LWC eran más resistentes a este ataque que los NC. Nyame [197], por ejemplo, analizó morteros con LWA finos, con mayor porosidad que su equivalente con árido tradicional, pero con penetración de iones cloruro, menor. Este hecho se atribuyó a la filtración reducida en el ITZ y a la mejor hidratación interna del cemento por el árido. También Thomas [198] y Liu, Chia y Zhang [1] verificaron este hecho.

El Ns también juega un papel importante en la resistencia a este ataque, por ejemplo, Said, et al. [199] analiza las propiedades del hormigón con Ns, utilizando también el método colorimétrico para la penetración de cloruros, resultando que las muestras sin Ns sufrieron penetraciones de 8 y 10 mm y las que sí, niveles cercanos a 5 mm, similares a los del hormigón de este trabajo. El uso de CV que sustituye al cemento también se analizó en el trabajo anterior, dando como resultado niveles similares en las muestras independientemente de la relación de sustitución.

El trabajo de Zahedi, Ramezaniapour y Ramezaniapour [200] analiza morteros con alto contenido en cemento y Ns siendo más resistentes a cloruros que las mezclas con Ns. La variación en el contenido de cemento (entre 825 y 1000  $\text{kg/m}^3$ ) no parece tener un efecto.



## 5E4F. INTERFAZ ÁRIDO-PASTA

Las imágenes de microscopio de los ECO-HPC (Imagen 42) ponen de manifiesto la falta de adherencia entre el árido de corcho y la pasta cementante, el árido de plástico, por el contrario, no muestra signos de agrietamiento por lo que su impermeabilidad no parece ser conflicto en la ITZ.



Imagen 42 - Imágenes de microscopio de la interfaz árido-pasta del ECO-HUL a los 28 días



## 5E4G. RESUMEN DURABILIDAD

Como resumen de los ensayos anteriores se presenta, con los datos categorizados, la **Tabla 86**, asignando a cada resultado una categoría del 1 al 4 siendo el 1 el resultado de más resistencia (mecánica o durabilidad) y el 4 el que menos. En este último cuadro se aprecia con más claridad como el hormigón con durabilidad más alta también es el que más resistencia (el HPC 700) y densidad tiene, seguido del otro hormigón no ligero, en hormigones ligeros también aporta mejores resultados el que más cantidad tienen de cemento.

Las diferencias entre los hormigones con más cantidad de cemento frente a sus análogos con menos, aunque mejoran, no son muy llamativas, llegando a superar en algunos ensayos los hormigones 550 a los 700 (módulo elástico y porosidad).

Tabla 86 – Resumen ensayos durabilidad categorizado

	HPC 550		HPC 700		ECO-HPC 550		ECO-HPC 700	
Porosidad Total (%)	9,83	<b>1</b>	10,01	<b>2</b>	17,75	<b>4</b>	11,84	<b>3</b>
Porosidad $\epsilon_c$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,013	<b>2</b>	0,012	<b>1</b>	0,016	<b>4</b>	0,014	<b>3</b>
Profundidad media en penetración agua a presión (mm)	7	<b>2_3</b>	5	<b>1</b>	7	<b>2_3</b>	9	<b>4</b>
Profundidad de carbonatación 56 días (mm)	3,26	<b>2</b>	0	<b>1</b>	5,89	<b>4</b>	4,88	<b>3</b>
Penetración de ion cloruro 56 días (mm)	5,9	<b>1</b>	8,6	<b>4_5</b>	8,2	<b>2</b>	8,6	<b>4_5</b>
Densidad kg/m <sup>3</sup>	2303	<b>2</b>	2329	<b>1</b>	1860	<b>4</b>	1872	<b>3</b>
Resistencia a Compresión a 28 días (MPa)	83,2	<b>2</b>	88,7	<b>1</b>	26,2	<b>4</b>	28,8	<b>3</b>
Módulo elástico a los 28 días	84,8	<b>1</b>	48,4	<b>2</b>	20,9	<b>4</b>	35,2	<b>3</b>



## 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 6A. INTRODUCCIÓN

Con este trabajo se dan por conseguidos los siguientes objetivos que se marcaron en el plan de investigación al comenzar el estudio:

Objetivos generales

- Poner a disposición de la industria de la construcción una alternativa fiable, innovadora, ecológica, económicamente viable y competitiva para la producción de hormigón ligero.
- La valorización y reutilización de subproductos de otros sectores, que hasta el momento son considerados residuos.
- Colaborar en reducir la contaminación, dando un beneficio al medio ambiente, reduciendo la cantidad de desechos que se incineran, minimizando los residuos de la zona.

Objetivos específicos:

- Avance en el conocimiento del comportamiento "como áridos" de materiales plásticos y de papel reciclados para ser utilizados en la elaboración de elementos constructivos.
- Estudio del comportamiento del hormigón ligero que se desarrollen en la investigación (aspectos técnicos, ecológicos y económicos).
- Estudiar la durabilidad para asegurar que el empleo de los residuos plásticos, de papel y la nanotecnología en el hormigón no compromete la seguridad estructural.
- Definir una aplicación práctica que ilustre las bondades de las aplicaciones nanotecnológicas en el área de los materiales de construcción, en este caso un aditivo que mejore algunas propiedades de hormigones ligeros.
- Poder analizar y/o entender los mecanismos de mejora de las propiedades materiales y/o estructurales que genera el uso de un agente basado en nanotecnología "aditivos con nanosílice".
- Determinación de la influencia de las nanopartículas de sílice en el hormigón ligero frente a la acción de agentes que son agresivos para éste que afectan su durabilidad considerando los efectos superficiales y estructurales, físicos y químicos, de esta acción en el hormigón ligero.

## **6B. CONCLUSIONES**

De acuerdo con los resultados del trabajo experimental realizado, se pueden extraer las siguientes observaciones y conclusiones:

1. La incorporación de áridos reciclados produce una disminución en la resistencia a la compresión debido a su menor resistencia y características de superficie, debilitando la zona intersticial pasta de cemento/ áridos (ITZ). En este trabajo se ha obtenido hormigón con áridos reciclados ligeros dentro de los márgenes de resistencia establecidos por el Eurocódigo 2, (código modelo FIB 2010), así como muchos de los códigos y estándares internacionales para LWC estructurales.
2. La combinación de árido plástico y corcho permite reducir la densidad y alcanzar resistencia para un uso estructural del hormigón. El árido plástico reduce ligeramente la densidad sin influir significativamente en la resistencia a compresión, el corcho permite reducir significativamente la densidad a costa de grandes reducciones en la resistencia.
3. La sustitución de un 18.5% en volumen, de áridos tradicionales, por corcho y un 29.5% de sustitución por árido de plástico reduce la resistencia a compresión del hormigón en un 68% y la densidad en un 19%.
4. El aumento en la cantidad de cemento, de 550 a 700kg/m<sup>3</sup> no conlleva una mejora sustancial en la resistencia ni en la microestructura.
5. La relación entre resistencia a compresión y a tracción es lineal.
6. El módulo elástico también está relacionado con la resistencia a compresión, pero dicha relación es mucho más difusa en estos hormigones. Esto se debe a que el módulo está muy influenciado por la microestructura y la retracción. Una baja porosidad en el rango capilar disminuye la capacidad de retracción del hormigón y las tensiones causadas inducen altos valores de módulo elástico. Es interesante observar la poca influencia que tienen los áridos en la porosidad, el módulo elástico y la retracción.
7. En todos los hormigones, la distribución del volumen de los poros obtenidos sigue un patrón similar. La porosidad en el rango capilar es la que afecta la resistencia. En este rango, el HPC700 tiene el porcentaje más bajo (4.2%). El HPC550 tiene una porosidad total más baja (9.83%) pero esta se concentra en un rango de poros más finos, fuera del rango capilar.
8. La baja relación agua/cemento y la incorporación de Ns conducen a una baja porosidad, especialmente en el rango capilar.
9. Los ECOHPC tienen una mayor absorción capilar (58% para aquellos con 550kg/m<sup>3</sup> de cemento y 50% para 700). La absorción de los HPC es mucho menor que la de los ECOHPC, probablemente debido a la ausencia de LWA. El HPC 550 es un 8.20% más absorbente que el HPC 700, tal vez debido a la menor densidad de su matriz de cemento. ECOHPC 700 es 35% menos absorbente que el HPC y 80% menos que ECOHPC 550.

10. Todos los hormigones tienen una profundidad de carbonatación muy baja (inferior a 6 mm a los 56 días), con caras de muestras en las que el frente de carbonatación prácticamente no tiene profundidad, especialmente en el HPC 700. Se obtuvieron resultados similares en las pruebas de penetración de agua a presión (por debajo de 10 mm) y la penetración de iones de cloruro (por debajo de 10 mm a los 56 días).
11. Una sustitución parcial de AT por ligeros de plástico y corcho reciclados, en hormigones con Ns y alta cantidad de cemento, no afecta a la retracción total.

Los hormigones diseñados y analizados en esta investigación han demostrado que el uso de LWA reciclado cambia sustancialmente la densidad del hormigón y su resistencia a compresión (básicamente de forma lineal). Sin embargo, en el lado positivo, se ha encontrado que las cuatro dosificaciones de referencia adoptadas se han comportado de manera similar en las pruebas de durabilidad (cloruros, carbonatación, penetración de agua, etc.); en particular, la carbonatación cero o casi cero de todos los HPC y ECOHPC se destaca junto con las penetraciones de cloruro de menos de 1 cm en todas las mezclas. Esto significa que una vez que se controle la pérdida de resistencia mecánica de ECOHPC en comparación con HPC, será posible diseñar hormigón de muy alto rendimiento para diferentes aplicaciones estructurales, con una vida útil extendida.

## **6C. TRABAJOS FUTUROS**

El trabajo de investigación realizado puede ser continuado por varias líneas

- En cuanto a la aplicación industrial se podría enfocar la fabricación de los áridos de plástico de forma específica y más eficiente para su uso como árido ya que en la actualidad, el utilizado en este trabajo, se ofrece comercialmente sin uso definido. De esta forma se propone buscar la irregularidad en la superficie de los gránulos y la variación en su tamaño buscando una granulometría más compensada y ajustada al hormigón.
- En cuanto a la eficiencia económica, se podría, analizar la mejora que supondría, la reducción en el peso propio de las estructuras, que conlleva una reducción en el tamaño de estas, así como una reducción en el transporte de material a la obra.
- En cuanto a su comportamiento, queda por analizar su respuesta ante sismo, que es una de las mejoras principales del hormigón ligero
- En cuanto a las adiciones, los lodos de papel calcinados se muestran como una posible adición puzolánicamente activa para el hormigón, los resultados resultan prometedores en cuanto a resistencia, pero deben realizarse estudios con más profundidad.
- En trabajabilidad, queda analizar los procesos de su puesta en obra ya que, la complejidad que implica el uso de hormigones ligeros es alta, debido a comportamientos como la tendencia a segregación o la menor plasticidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Liu X, Chia KS, Zhang MH. Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2011;25(1):335-43.
- [2] Schmidheiny S. Changing course: A global business perspective on development and the environment: MIT press; 1992.
- [3] Gartner EM, Macphee DE. A physico-chemical basis for novel cementitious binders. *Cement and Concrete Research*. 2011;41(7):736-49.
- [4] Lehne JP, Felix;. Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete. London: The Royal Institute of International Affairs; 2018.
- [5] Gartner E. Potential improvements in cement sustainability. *Proc 31st Cement Concrete Sci Conf2011*. p. 13.
- [6] Shi C, Jiménez AF, Palomo A. New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*. 2011;41(7):750-63.
- [7] Celik K, Meral C, Gursel AP, Mehta PK, Horvath A, Monteiro PJ. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. *Cement and Concrete Composites*. 2015;56:59-72.
- [8] Kiliç A, Atis CD, Yasar E, Özcan F. High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*. 2003;33(10):1595-9.
- [9] Hossain KMA, Ahmed S, Lachemi M. Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: Mechanical and durability characteristics. *Construction and Building Materials*. 2011;25(3):1186-95.
- [10] Uygunoglu T, Topçu IB. Thermal expansion of self-consolidating normal and lightweight aggregate concrete at elevated temperature. *Construction and Building Materials*. 2009;23(9):3063-9.
- [11] Tanyildizi H, Coskun A. The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*. 2008;22(11):2269-75.
- [12] Tanyildizi H, Coskun A. Performance of lightweight concrete with silica fume after high temperature. *Construction and Building Materials*. 2008;22(10):2124-9.
- [13] Akcay B, Tasdemir MA. Effects of lightweight aggregates on autogenous deformation in concrete. *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*. In: KONSTA-GDOUTOS MS, editor.: Springer Netherlands; 2006. p. 163-70.
- [14] Tanyildizi H, Çevik A. Modeling mechanical performance of lightweight concrete containing silica fume exposed to high temperature using genetic programming. *Construction and Building Materials*
- Special Issue on Fracture, Acoustic Emission and NDE in Concrete (KIFA-5)2010. p. 2612-8.
- [15] Yang KH, Ashour AF. Aggregate interlock in lightweight concrete continuous deep beams. *Engineering Structures*. 2011;33(1):136-45.
- [16] Lo TY, Cui HZ, Tang WC, Leung WM. The effect of aggregate absorption on pore area at interfacial zone of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2008;22(4):623-8.
- [17] K.J. M. Development and tests of lightweight aggregate using sewage sludge for nonstructural concrete. *Construction and Building Materials*. 2007;21(7):1583-8.
- [18] Lo TY, Tang WC, Nadeem A. Comparison of carbonation of lightweight concrete with normal weight concrete at similar strength levels. *Construction and Building Materials*. 2008;22(8):1648-55.
- [19] Liu X, Chia KS, Zhang MH. Development of lightweight concrete with high resistance to water and chloride-ion penetration. *Cement and Concrete Composites*. 2010;32(10):757-66.
- [20] Lo TY, Cui HZ, Nadeem A, Li ZG. The effects of air content on permeability of lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*. 2006;36(10):1874-8.
- [21] Lo TY, Nadeem A, Tang WCP, Yu PC. The effect of high temperature curing on the strength and carbonation of pozzolanic structural lightweight concretes. *Construction and Building Materials*. 2009;23(3):1306-10.
- [22] Rossignolo JA, Agnesini MVC. Mechanical properties of polymer-modified lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*. 2002;32(3):329-34.

- [23] Lo TY, Cui HZ. Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrete. *Materials Letters*. 2004;58(6):916-9.
- [24] Ke Y, Beaucour AL, Ortola S, Dumontet H, Cabrillac R. Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 2009;23(8):2821-8.
- [25] Zareef ME, Schlaich M. *Infra-lightweight concrete*. Tailor Made Concrete Structures: CRC Press; 2008. p. 159-.
- [26] Jo BW, Park SK, Park JB. Properties of concrete made with alkali-activated fly ash lightweight aggregate (AFLA). *Cement and Concrete Composites*. 2007;29(2):128-35.
- [27] Kayali O, Zhu B. Chloride induced reinforcement corrosion in lightweight aggregate high-strength fly ash concrete. *Construction and Building Materials*. 2005;19(4):327-36.
- [28] Kockal NU, Ozturan T. Durability of lightweight concretes with lightweight fly ash aggregates. *Construction and Building Materials*. 2011;25(3):1430-8.
- [29] Chi JM, Huang R, Yang CC, Chang JJ. Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2003;25(2):197-205.
- [30] Gesoglu M, Özturan T, Güneyisi E. Effects of cold-bonded fly ash aggregate properties on the shrinkage cracking of lightweight concretes. *Cement and Concrete Composites*. 2006;28(7):598-605.
- [31] Kockal NU, Ozturan T. Strength and elastic properties of structural lightweight concretes. *Materials & Design*. 2011;32(4):2396-403.
- [32] Ünal O, Uygunoglu T, Yildiz A. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. *Building and Environment*. 2007;42(2):584-90.
- [33] Mounanga P, Gbongbon W, Poullain P, Turcry P. Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes. *Cement and Concrete Composites*. 2008;30(9):806-14.
- [34] Demirdag S, Ugur I, Sarac S. The effects of cement/fly ash ratios on the volcanic slag aggregate lightweight concrete masonry units. *Construction and Building Materials*. 2008;22(8):1730-5.
- [35] Sharma R, Bansal PP. Use of different forms of waste plastic in concrete—a review. *Journal of Cleaner Production*. 2016;112:473-82.
- [36] MAGARINOS OE, ALDERETE CE, ARIAS LE, LUCCA ME. Estudio de morteros que contienen escamas de plástico procedente de residuos post-industriales Study of mortars with industrial residual plastic scales.
- [37] Gu L, Ozbakkaloglu T. Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*. 2016;51:19-42.
- [38] Najim KB, Hall MR. Crumb rubber aggregate coatings/pre-treatments and their effects on interfacial bonding, air entrapment and fracture toughness in self-compacting rubberised concrete (SCRC). *Materials and structures*. 2013;46(12):2029-43.
- [39] da Silva AM, de Brito J, Veiga R. Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars. *Construction and Building Materials*. 2014;71:226-36.
- [40] Siddique R, Khatib J, Kaur I. Use of recycled plastic in concrete: a review. *Waste management*. 2008;28(10):1835-52.
- [41] Coppola B, Courard L, Michel F, Incarnato L, Di Maio L. Investigation on the use of foamed plastic waste as natural aggregates replacement in lightweight mortar. *Composites Part B: Engineering*. 2016;99:75-83.
- [42] Saikia N, de Brito J. Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and building materials*. 2014;52:236-44.
- [43] Saikia N, de Brito J. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*. 2012;34:385-401.
- [44] Marzouk OY, Dheilly RM, Queneudec M. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Management*. 2007;27(2):310-8.
- [45] Hannawi K, Kamali-Bernard S, Prince W. Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste Management*. 2010;30(11):2312-20.
- [46] Ferreira L, de Brito J, Saikia N. Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate. *Construction and Building Materials*. 2012;36:196-204.



- [47] Moreira A, António J, Tadeu A. Lightweight screed containing cork granules: Mechanical and hygrothermal characterization. *Cement and Concrete Composites*. 2014;49:1-8.
- [48] Panesar D, Shindman B. The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork. *Cement and Concrete Composites*. 2012;34(9):982-92.
- [49] Bachar M, Azzouz L, Rabehi M, Mezghiche B. Characterization of a stabilized earth concrete and the effect of incorporation of aggregates of cork on its thermo-mechanical properties: Experimental study and modeling. *Construction and Building Materials*. 2015;74:259-67.
- [50] Teo DCL, Mannan MA, Kurian VJ, Ganapathy C. Lightweight concrete made from oil palm shell (OPS): Structural bond and durability properties. *Building and Environment*. 2007;42(7):2614-21.
- [51] Shafigh P, Jumaat MZ, Mahmud H. Oil palm shell as a lightweight aggregate for production high strength lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2011;25(4):1848-53.
- [52] Nagdi K. Rubber as an engineering material : guideline for users. Munich ; New York: Hanser Publishers; 1993.
- [53] Azevedo F, Pacheco-Torgal F, Jesus C, de Aguiar JB, Camões A. Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes. *Construction and Building Materials*. 2012;34:186-91.
- [54] Plásticos CEEd. 2009.
- [55] Kou SC, Lee G, Poon CS, Lai WL. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Management*. 2009;29(2):621-8.
- [56] Kan A, Demirboga R. A novel material for lightweight concrete production. *Cement and Concrete Composites*. 2009;31(7):489-95.
- [57] Malloy R, Desai N, Wilson C, Swan C, Jansen D, Kashi M. High carbon fly ash/mixed thermoplastic aggregate for use in lightweight concrete. Society of Plastics Engineering, Annual Technical Conference, Dallas, TX2001. p. 2743-51.
- [58] Panyakapo P, Panyakapo M. Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete. *Waste Management*. 2008;28(9):1581-8.
- [59] Ismail ZZ, Al-Hashmi EA. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management*. 2008;28(11):2041-7.
- [60] Albano C, Camacho N, Hernández M, Matheus A, Gutiérrez A. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*. 2009;29(10):2707-16.
- [61] Ben Fraj A, Kismi M, Mounanga P. Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2010;24(6):1069-77.
- [62] Choi YW, Moon DJ, Kim YJ, Lachemi M. Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. *Construction and Building Materials*. 2009;23(8):2829-35.
- [63] Choi Y-W, Moon D-J, Chung J-S, Cho S-K. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*. 2005;35(4):776-81.
- [64] González B, Llamas B, Juan A, Guerra I. Tests on concrete containing cork powder admixtures. *Materiales de Construcción*. 2007;57(286):83-90.
- [65] Fonseca TJ, Parresol BR. A new model for cork weight estimation in Northern Portugal with methodology for construction of confidence intervals. *Forest Ecology and Management*. 2001;152(1):131-9.
- [66] Karade SR, Irle M, Maher K. Influence of granule properties and concentration on cork-cement compatibility. *Holz als Roh-und Werkstoff*. 2006;64(4):281.
- [67] Rodríguez Martínez ED. Efecto de la incorporación de materiales basados en sílice sobre las propiedades de matrices de cemento pórtland y activadas alcalinamente. 2012.
- [68] Biricik H, Sarier N. Comparative study of the characteristics of nano silica-, silica fume-and fly ash-incorporated cement mortars. *Materials Research*. 2014;17(3):570-82.
- [69] Lim S, Mondal P. Effects of incorporating nanosilica on carbonation of cement paste. *Journal of Materials Science*. 2015;50(10):3531-40.
- [70] Ji T. Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>. *Cement and Concrete Research*. 2005;35(10):1943-7.
- [71] Quercia G, Brouwers H. Application of nano-silica (nS) in concrete mixtures. 8th fib PhD symposium in Kgs Lyngby, Denmark2010. p. 431-6.

- [72] Björnström J, Martinelli A, Matic A, Börjesson L, Panas I. Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement. *Chemical Physics Letters*. 2004;392(1):242-8.
- [73] Dunster A. *Silica Fume in Concrete* (BRE Information Paper). IHS BRE Press; 2009. p. 12.
- [74] Pera J, Amrouz A. Development of highly reactive metakaolin from paper sludge. *Advanced Cement Based Materials*. 1998;7(2):49-56.
- [75] Frías M, Sánchez de Rojas MI, Rodríguez Largo O. Novedades en el reciclado de materiales en el sector de la construcción: adiciones puzolánicas. 2008.
- [76] Frías M, García R, Vigil R, Ferreiro S. Calcination of art paper sludge waste for the use as a supplementary cementing material. *Applied Clay Science*. 2008;42(1):189-93.
- [77] de la Villa RV, Frías M, de Rojas MIS, Vegas I, García R. Mineralogical and morphological changes of calcined paper sludge at different temperatures and retention in furnace. *Applied Clay Science*. 2007;36(4):279-86.
- [78] Clarke JL. *Structural lightweight aggregate concrete*: CRC Press; 2014.
- [79] Mo KH, Alengaram UJ, Jumaat MZ, Yap SP. Feasibility study of high volume slag as cement replacement for sustainable structural lightweight oil palm shell concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2015;91:297-304.
- [80] Keleştemur O, Demirel B. Effect of metakaolin on the corrosion resistance of structural lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2015;81:172-8.
- [81] Shafigh P, Mahmud HB, Jumaat MZB, Ahmmad R, Bahri S. Structural lightweight aggregate concrete using two types of waste from the palm oil industry as aggregate. *Journal of cleaner production*. 2014;80:187-96.
- [82] Aslam M, Shafigh P, Jumaat MZ, Lachemi M. Benefits of using blended waste coarse lightweight aggregates in structural lightweight aggregate concrete. *Journal of cleaner production*. 2016;119:108-17.
- [83] Memon SA, Cui H, Zhang H, Xing F. Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete. *Applied Energy*. 2015;139:43-55.
- [84] Bogas JA, Gomes A. Non-steady-state accelerated chloride penetration resistance of structural lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2015;60:111-22.
- [85] M.J. S. Characteristics of lightweight concrete containing mineral admixtures. *Construction and Building Materials* Composite Materials and Adhesive Bonding Technology 2011. p. 658-62.
- [86] Glenn GM, Klamczynski AK, Chiou BS, Wood D, Orts WJ, Imam SH. Lightweight Concrete Containing an Alkaline Resistant Starch-Based Aquagel. *Journal of Polymers and the Environment*. 2004;12(3):189-96.
- [87] McBride SP, Shukla A, Bose A. Processing and characterization of a lightweight concrete using cenospheres. *Journal of Materials Science*. 2002;37(19):4217-25.
- [88] Sengul O, Azizi S, Karaosmanoglu F, Tasdemir MA. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy and Buildings*. 2011;43(2):671-6.
- [89] Ke Y, Ortola S, Beaucour AL, Dumontet H. Identification of microstructural characteristics in lightweight aggregate concretes by micromechanical modelling including the interfacial transition zone (ITZ). *Cement and Concrete Research*. 2010;40(11):1590-600.
- [90] Tang CW, Chen HJ, Wang SY, Spaulding J. Production of synthetic lightweight aggregate using reservoir sediments for concrete and masonry. *Cement and Concrete Composites*. 2011;33(2):292-300.
- [91] Lo TY, Tang WC, Cui HZ. The effects of aggregate properties on lightweight concrete. *Building and Environment*. 2007;42(8):3025-9.
- [92] Maltais Y, Ouellet E, Marchand J, Samson E, Burke D. Prediction of the long-term durability of lightweight aggregate concrete mixtures under severe marine environment. *Materials and Structures*. 2006;39(9):911-8.
- [93] Haque N, Al-Khaiat H. Strength and durability of lightweight concrete in hot marine exposure conditions. *Materials and Structures*. 1999;32(7):533-8.
- [94] Haque MN, Al-Khaiat H, Kayali O. Strength and durability of lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2004;26(4):307-14.

- [95] Polat R, Demirboga R, Karakoç MB, Türkmen I. The influence of lightweight aggregate on the physico-mechanical properties of concrete exposed to freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*. 2010;60(1):51-6.
- [96] Wu Z, Zhang Y, Zheng J, Ding Y. An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*
- Compatibility of Plasters and Renders on Salt Loaded Substrates 2009. p. 2087-92.
- [97] Jones MR, McCarthy A. Heat of hydration in foamed concrete: Effect of mix constituents and plastic density. *Cement and Concrete Research*. 2006;36(6):1032-41.
- [98] Chindaprasirt P, Rattanasak U. Shrinkage behavior of structural foam lightweight concrete containing glycol compounds and fly ash. *Materials & Design*. 2011;32(2):723-7.
- [99] Miled K, Sab K, Le Roy R. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: Experimental investigation and modelling. *Mechanics of Materials*. 2007;39(3):222-40.
- [100] Lura P, Bisschop J. On the origin of eigenstresses in lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*
- Early Age Concrete - Properties and Performance 2004. p. 445-52.
- [101] Metin H. The effects of bond strengths between lightweight and ordinary aggregate-mortar, aggregate-cement paste on the mechanical properties of concrete. *Materials Science and Engineering: A*. 2003;363(1):152-8.
- [102] Aspdin J. An improvement in the modes of producing artificial stone. *Brevet britannique BP*. 1824;5022:1824.
- [103] Fomento EMd. RC-16: Instrucción para la recepción de cementos : con los comentarios de los miembros de la Comisión Permanente de Cemento: Ministerio de Fomento; 2016.
- [104] Fomento Md. Instrucción de hormigón estructural. EHE: Ministerio de Fomento. Centro de publicaciones; 2009.
- [105] Normalización AEd. UNE-EN 196-10: métodos de ensayo de cementos. Determinación del contenido de cromo (VI) soluble en agua en cementos. AENOR; 2008.
- [106] Normalización AEd. UNE-EN 450-1:2006+A1: cenizas volantes para hormigón. Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad. AENOR; 2008.
- [107] Sanchez F, Sobolev K. Nanotechnology in concrete—a review. *Construction and Building Materials*. 2010;24(11):2060-71.
- [108] Nazari A, Riahi S. The effects of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete. *Composites Part B: Engineering*. 2011;42(3):570-8.
- [109] Aly M, Hashmi M, Olabi A, Messeiry M, Abadir E, Hussain A. Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and physical behaviour of waste-glass cement mortar. *Materials & Design*. 2012;33:127-35.
- [110] Givi AN, Rashid SA, Aziz FNA, Salleh MAM. The effects of lime solution on the properties of SiO<sub>2</sub> nanoparticles binary blended concrete. *Composites Part B: Engineering*. 2011;42(3):562-9.
- [111] Pourjavadi A, Fakoorpoor SM, Khaloo A, Hosseini P. Improving the performance of cement-based composites containing superabsorbent polymers by utilization of nano-SiO<sub>2</sub> particles. *Materials & Design*. 2012;42:94-101.
- [112] Naji Givi A, Abdul Rashid S, Aziz FNA, Salleh MAM. Experimental investigation of the size effects of SiO<sub>2</sub> nano-particles on the mechanical properties of binary blended concrete. *Composites Part B: Engineering*. 2010;41(8):673-7.
- [113] Monte MC, Fuente E, Blanco A, Negro C. Waste management from pulp and paper production in the European Union. *Waste management*. 2009;29(1):293-308.
- [114] Vegas I, Urreta J, Frías M, García R. Freeze–thaw resistance of blended cements containing calcined paper sludge. *Construction and Building Materials*. 2009;23(8):2862-8.
- [115] WasteWatch. Plastic recycling information sheet. UK; 2006.
- [116] APME AoPMiE. Plastic recovery in perspective: plastics consumption and recovery in Western Europe. 2004.
- [117] EPA. Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2003 2003.
- [118] Mundoplast. La producción de plásticos en España creció un 1,9% en 2011. mundoplast 2012.
- [119] Uses of plastics and recycled plastics,. Recycling and Resource Recovery Council. Australia 1994.

- [120] Batayneh M, Marie I, Asi I. Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management*. 2007;27(12):1870-6.
- [121] Remadnia A, Dheilly RM, Laidoudi B, Quéneudec M. Use of animal proteins as foaming agent in cementitious concrete composites manufactured with recycled PET aggregates. *Construction and Building Materials*. 2009;23(10):3118-23.
- [122] Akçaözoğlu S, Atiş CD, Akçaözoğlu K. An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management*. 2010;30(2):285-90.
- [123] Frigione M. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management*. 2010;30(6):1101-6.
- [124] Bravo M, de Brito J. Concrete made with used tyre aggregate: durability-related performance. *Journal of Cleaner Production*. 2012;25:42-50.
- [125] Ganjian E, Khorami M, Maghsoudi AA. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*. 2009;23(5):1828-36.
- [126] Son KS, Hajirasouliha I, Pilakoutas K. Strength and deformability of waste tyre rubber-filled reinforced concrete columns. *Construction and Building Materials*. 2011;25(1):218-26.
- [127] Su H, Yang J, Ling T-C, Ghataora GS, Dirar S. Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*. 2014.
- [128] Pacheco-Torgal F, Ding Y, Jalali S. Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview. *Construction and Building Materials*. 2012;30:714-24.
- [129] Brás A, Leal M, Faria P. Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-EPS mortars performance. *Construction and Building Materials*. 2013;49:315-27.
- [130] De-Carvalho R, Teixeira-Dias F, Varum H. Cyclic behaviour of a lightweight mortar with cork granulate composite. *Composite Structures*. 2013;95:748-55.
- [131] Go CG, Tang JR, Chi JH, Chen CT, Huang YL. Fire-resistance property of reinforced lightweight aggregate concrete wall. *Construction and Building Materials*. 2012;30(0):725-33.
- [132] Du L, Folliard KJ. Mechanisms of air entrainment in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2005;35(8):1463-71.
- [133] García Hortal JA. *Fibras papeleras*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña; 2007.
- [134] Gram HE. *Durability of Natural Fibres in Concrete: Swedish Cement and Concrete Research Inst.*; 1983.
- [135] Macías Mesa JA, Artola Pimentel MdL, Hernández Ramos PJ. Utilización de fibras en hormigones. La experiencia Cubana con el empleo de "Fibrequen". 2012.
- [136] Fernandes Diniz JMB, Gil MH, Castro JAAM. Hornification—its origin and interpretation in wood pulps. *Wood Sci Technol*. 2004;37(6):489-94.
- [137] Claramunt J, Ardanuy M, García-Hortal JA, Tolêdo Filho RD. The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*. 2011;33(5):586-95.
- [138] Llerena Encalada A. Estudio de compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales: Evaluación previa del comportamiento de un panel de cemento blanco con adición de meta-caolín reforzado con un textil no-tejido de fibras largas de lino y cáñamo [Master thesis]. Barcelona: Universidad politécnica de Cataluña; 2015.
- [139] Meseguer A, Cabre JF, Portero C. Jimenez Montoya - Hormigón Armado. 15 ed: Gustavo Gili; 2009.
- [140] Aligizaki KK. *Pore Structure of Cement-Based Materials: Testing, Interpretation and Requirements*: Taylor & Francis; 2005.
- [141] García-Taengua E, Sonebi M, Hossain KMA, Lachemi M, Khatib J. Effects of the addition of nanosilica on the rheology, hydration and development of the compressive strength of cement mortars. *Composites Part B: Engineering*. 2015;81:120-9.
- [142] Kayali O, Haque MN, Zhu B. Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash. *Cement and Concrete Research*. 1999;29(11):1835-40.
- [143] Elsharief A, Cohen MD, Olek J. Influence of lightweight aggregate on the microstructure and durability of mortar. *Cement and Concrete Research*. 2005;35(7):1368-76.
- [144] Kockal NU, Ozturan T. Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the behavior of lightweight concretes. *Journal of Hazardous Materials*. 2010;179(1ΓÇô3):954-65.
- [145] Gao XF, Lo YT, Tam CM. Investigation of micro-cracks and microstructure of high performance lightweight aggregate concrete. *Building and Environment*. 2002;37(5):485-9.



- [146] Institution BS. Eurocode 2: Design of concrete structures: Part 1.4 General rules - Lightweight aggregate concrete with closed structure (together with United Kingdom National Application Document). Draft for Development: DD ENV 1992-1-4 : 1996: BSI; 2000.
- [147] Hernández Montes E, Gil Martín LM. Hormigón armado y pretensado: concreto reforzado y preesforzado. Granada: [Universidad de Granada], Grupo de Investigación TEP-190 Ingeniería e Infraestructuras; 2007.
- [148] Baronio G, Berra M, Bertolini L, Pastore T. Steel corrosion monitoring in normal and total-lightweight concretes exposed to chloride and sulphate solutions part II: Polarisation resistance measurements. *Cement and Concrete Research*. 1996;26(5):691-6.
- [149] Thomas M, Bremner T. Performance of lightweight aggregate concrete containing slag after 25 years in a harsh marine environment. *Cement and Concrete Research*. 2012;42(2):358-64.
- [150] Alduaij J, Alshaleh K, Haque M, Ellaithy K. Lightweight concrete in hot coastal areas. *Cement and Concrete Composites*. 1999;21(5):453-8.
- [151] Lanzón M, García-Ruiz PA. Lightweight cement mortars: Advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability. *Construction and Building Materials*. 2008;22(8):1798-806.
- [152] Correia J, de Brito J, Pereira A. Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates. *Materials and Structures*. 2006;39(2):169-77.
- [153] Teo D, Mannan M, Kurian V. Durability of lightweight OPS concrete under different curing conditions. *Materials and Structures*. 2010;43(1):1-13.
- [154] Bermejo Núñez EB, Gálvez Ruíz J, Moragues Terrades A, Fernández Cánovas M. Influencia de la estructura porosa en la durabilidad de hormigones autocompactantes de similar resistencia. 2010.
- [155] STUTECH. Permeability of Concrete. 1992. p. 1-73.
- [156] Cánovas MF. Hormigón: adaptado a la Instrucción de Recepción de Cementos y a la Instrucción de Hormigón Estructural EHE. 8 ed: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; 2007.
- [157] Mehta PK. Pozzolanic and Cementitious Byproducts as Mineral Admixtures for Concrete - A Critical Review. Special Publication. 1983;79.
- [158] Juan RS. Segunda vida de los neumáticos usados. Universidad de Buenos Aires, Argentina, Química Viva. 2012;11(1):24-39.
- [159] Castro G. Materiales y compuestos para la industria del neumático. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería Mecánica.; 2008. p. 57.
- [160] E.Freyssinet. High-early-strength concrete with Portland cement. *Cem Concr Manufacture*. 1936;9.
- [161] Roy D, Gouda G. Optimization of strength in cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 1975;5(2):153-62.
- [162] Richard P, Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes. *Cement and concrete research*. 1995;25(7):1501-11.
- [163] Thorenfeldt E. Design Criteria of Light weight Aggregate Concrete. CEB/FIP International Symposium on Structural Light weight Aggregate Concrete. Sandefjord, Norway 1995.
- [164] fib. Materials. fib Model Code for Concrete Structures 2010: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2013. p. 74-150.
- [165] Beushausen H, Gillmer M. The use of superabsorbent polymers to reduce cracking of bonded mortar overlays. *Cement and Concrete Composites*. 2014;52:1-8.
- [166] Neville AM. Properties of concrete: Longman London; 1995.
- [167] Reichard TW. Creep and Drying Shrinkage of Lightweight and Normal-Weight Concretes. National Bureau of Standards Reports. Washington D.C.: United States. Government Printing Office.; 1964. p. 38.
- [168] Li Y, Li J. Capillary tension theory for prediction of early autogenous shrinkage of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*. 2014;53:511-6.
- [169] Wu L, Farzadnia N, Shi C, Zhang Z, Wang H. Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review. *Construction and Building Materials*. 2017;149:62-75.
- [170] Altoubat SA, Lange DA. Tensile basic creep: measurements and behavior at early age. *Urbana*. 2001;51:61801.
- [171] Tazawa E-i. Autogenous shrinkage of concrete: CRC Press; 1999.



- [172] Qing Y, Zenan Z, Deyu K, Rongshen C. Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construction and Building Materials*. 2007;21(3):539-45.
- [173] Sonebi M, García-Taengua E, Hossain KMA, Khatib J, Lachemi M. Effect of nanosilica addition on the fresh properties and shrinkage of mortars with fly ash and superplasticizer. *Construction and Building Materials*. 2015;84:269-76.
- [174] Deshapriya MAA. Role of cement content in determining resistance of concrete to reinforcement corrosion: University of Dundee; 2003.
- [175] Kumar R, Bhattacharjee B. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete. *Cement and concrete research*. 2003;33(1):155-64.
- [176] Meddah MS, Tagnit-Hamou A. Pore structure of concrete with mineral admixtures and its effect on self-desiccation shrinkage. *ACI Mater J*. 2009;106(3):241-50.
- [177] Mehta PK. *Concrete. Structure, properties and materials*. 1986.
- [178] Du H, Du S, Liu X. Effect of nano-silica on the mechanical and transport properties of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2015;82:114-22.
- [179] Nibudey R, Nagarnaik P, Parbat D, Pande A. Compressive strength and sorptivity properties of pet fiber reinforced concrete. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*. 2014;7(4):1206.
- [180] Karahan O, Hossain KM, Ozbay E, Lachemi M, Sancak E. Effect of metakaolin content on the properties self-consolidating lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2012;31:320-5.
- [181] Panesar D. Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. *Construction and building materials*. 2013;44:575-84.
- [182] Gonzalez JA, Algaba J, Andrade C. Corrosion of reinforcing bars in carbonated concrete. *British Corrosion Journal*. 1980;15(3):135-9.
- [183] Francois R, Maso J. Effect of damage in reinforced concrete on carbonation or chloride penetration. *Cement and Concrete Research*. 1988;18(6):961-70.
- [184] Peter M, Muntean A, Meier S, Böhm M. Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study. *Cement and Concrete Research*. 2008;38(12):1385-93.
- [185] Valcuende M, Parra C. Natural carbonation of self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*. 2010;24(5):848-53.
- [186] Hidalgo A, Petit S, Domingo C, Alonso C, Andrade C. Microstructural characterization of leaching effects in cement pastes due to neutralisation of their alkaline nature: Part I: Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2007;37(1):63-70.
- [187] Roziere E, Loukili A, Cussigh F. A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation. *Construction and Building Materials*. 2009;23(1):190-9.
- [188] Shi H-s, Xu B-w, Zhou X-c. Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete. *Construction and Building Materials*. 2009;23(5):1980-5.
- [189] Wassermann R, Katz A, Bentur A. Minimum cement content requirements: a must or a myth? *Materials and Structures*. 2009;42(7):973-82.
- [190] Sim J, Park C. Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. *Waste management*. 2011;31(11):2352-60.
- [191] Edwin RS, Gruyaert E, Dils J, De Belie N. Influence of Vacuum Mixing on the Carbonation Resistance and Microstructure of Reactive Powder Concrete Containing Secondary Copper Slag as Supplementary Cementitious Material (SCM). *Procedia Engineering*. 2017;171:534-42.
- [192] Liu J, Song S, Wang L. Durability and micro-structure of reactive powder concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed*. 2009;24(3):506-9.
- [193] Tragardh J. Microstructural features and related properties of self-compacting concrete. *Self-Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium held in Stockholm, Sweden 13-14 September 1999* 1999. p. 175-86.
- [194] Tam VW, Gao X, Tam C. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and concrete research*. 2005;35(6):1195-203.
- [195] Rodhe M, X-Betong. Properties of fresh and hardened concrete. Goteborg, Sweden: Chalmers University

of Technology; 1986. p. 30.

[196] Otsuki N, Nagataki S, Nakashita K. Evaluation of the AgNO<sub>3</sub> solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials. Construction and building materials. 1993;7(4):195-201.

[197] Nyame B. Permeability of normal and lightweight mortars. Magazine of Concrete Research. 1985;37.

[198] Thomas M. Chloride diffusion in high-performance lightweight aggregate concrete. Special Publication. 2006;234:797-812.

[199] Said AM, Zeidan MS, Bassuoni M, Tian Y. Properties of concrete incorporating nano-silica. Construction and Building Materials. 2012;36:838-44.

[200] Zahedi M, Ramezaniannpour AA, Ramezaniannpour AM. Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration. Construction and Building Materials. 2015;78:354-61.

## ANEXO I. LISTADO DE FIGURAS, TABLAS E IMÁGENES

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Relación densidad / Resistencia a compresión de las mezclas seleccionadas .....	25
Figura 2- Familias de áridos utilizados en los artículos seleccionados .....	25
Figura 3- Relación % de Ns - resistencia a compresión de distintos artículos científicos. ....	29
Figura 4- Relación % de Ns - resistencia a flexión de distintos artículos científicos .....	30
Figura 5- Actividad puzolánica de distintas adiciones [75] .....	32
Figura 6- Resistencia a Compresión de morteros de cemento a 2, 7 y 28 días [114].....	32
Figura 7- Consumo de plásticos en España por tipos Centro Español de Plásticos [54] .....	37
Figura 8 - Resistencia a compresión en función de la densidad.....	40
Figura 9- Resistencia a compresión en función de la densidad con línea de tendencia .....	40
Figura 10- Comparativa resistencia-densidad, LWC (Izda.) - árido plástico (Dcha.) .....	41
Figura 11- Resistencia a compresión en función del % de sustitución.....	41
Figura 12- Relación resistencia a compresión - densidad .....	42
Figura 13- Familias de aditivos utilizados en los artículos seleccionados .....	46
Figura 14- Aditivos utilizados en los artículos seleccionados .....	46
Figura 15- Esquema de partículas floculadas (izda.) y dispersas (dcha). ....	48
Figura 16- Esquema de la naturaleza química básica de los surfactantes. [132].....	49
Figura 17- Distribución de las moléculas de surfactante en la interfase agua - aire. [132] .....	49
Figura 18- Interacción entre burbujas de aire y partículas de cemento. [132].....	50
Figura 19- Relación entre la profundidad de penetración de agua y la concentración de Cloruros para hormigón normal (NWC50) y LWC (LWC50) en 3 ambientes salinos tras exposición de 2 años. [93] .....	58
Figura 20- Relación densidad / Resistencia a compresión de las mezclas seleccionadas .....	59
Figura 21- Dosificaciones promedio según su resistencia a compresión.....	61
Figura 22- Comparativa de la relación a/c y a/cm.....	62
Figura 23- Variación del módulo de elasticidad del hormigón con EPS respecto de la (macro) porosidad ( $p$ ), para cada tamaño de grano de EPS. [99] .....	63
Figura 24- Relación Densidad/Resistencia a Tracción distinguiendo los 3 tipos de áridos .....	66
Figura 25- Relación módulo de elasticidad / Densidad.....	67
Figura 26 - Esquema del modelo de ITZ. [91] .....	68
Figura 27- relación entre el módulo de Young del hormigón y la fracción de volumen de LWA. [24] .....	69
Figura 28- Resistencia a compresión del hormigón versus densidad de partícula de árido (a) y versus densidad a ratio de absorción de agua ( $p_{rd}/W_a$ ) (b). [24] .....	69
Figura 29- Resistencia a compresión del hormigón. [8] .....	70
Figura 30- Efecto del tamaño de árido en la capacidad normalizada de carga. [15].....	72
Figura 31- Vista de la interfase mortero/árido con microscopio electrónico de escaneo. [89] .....	72
Figura 32- Deformación en hormigones con distintos LWA [30] .....	75
Figura 33- Retracción por secado de LWC con aditivos [98] .....	76
Figura 34- Sortividad de LWC a 28 días. [20] .....	83
Figura 35- Imagen de la zona interfacial de 30 $\mu$ m entre cemento y árido (izquierda) y distribución de poros en la ITZ (derecha). [16] .....	86
Figura 36- Profundidad de carbonatación, (mm) bajo curación con calor, frente a exposición de 3, 7 y 28 días. [18] .....	90
Figura 37- Profundidad de carbonatación, (mm) bajo curación en ambiente marino cálido. [94] .....	91

Figura 38- Diagrama esquemático mostrando diferencia entre porosidad y permeabilidad [155].....	92
Figura 39- Valores de permeabilidad de cloruros a 28 y 56 días en testigos de hormigón [28] ..	94
Figura 40 - Porcentaje de arena, en función de su módulo granulométrico y del tamaño máximo del árido [156] .....	98
Figura 41- Distribución de tamaño de partícula del cemento .....	106
Figura 42 – Principales elementos del cemento.....	107
Figura 43- Datos de resistencia a compresión según UNE-EN 196-1 .....	108
Figura 44 – Análisis DRX del cemento .....	109
Figura 45- ATG del cemento .....	110
Figura 46- Distribución de tamaño de partícula de la CV .....	112
Figura 47 – Principales elementos de las CV .....	113
Figura 48- Datos de resistencia a compresión de la CV .....	114
Figura 49- Datos de resistencia a flexión de la CV .....	114
Figura 50 – Análisis DRX de las CV .....	115
Figura 51- ATG de la CV .....	116
Figura 52- Distribución de tamaño de partícula del HS.....	117
Figura 53- Principales elementos del HS.....	118
Figura 54 – Análisis DRX del HS .....	119
Figura 55 - ATG del HS.....	120
Figura 56 - Datos de resistencia a compresión.....	121
Figura 57 - Datos de resistencia a flexión .....	121
Figura 58- Distribución de tamaño de partícula de los lodos sin calcinar.....	122
Figura 59- Distribución de tamaño de partícula de los lodos calcinados .....	122
Figura 60 – Principales elementos del Lodo sin calcinar.....	123
Figura 61 – Principales elementos del Lodo calcinado .....	124
Figura 62- Datos de resistencia a compresión.....	125
Figura 63- Datos de resistencia a flexión.....	125
Figura 64 – Análisis DRX de los lodos sin calcinar .....	126
Figura 65 – Análisis DRX de los lodos calcinados.....	127
Figura 66 - ATG de los lodos sin calcinar .....	128
Figura 67 - ATG de los lodos calcinados .....	129
Figura 68 – Cantidad de poros según su tamaño. Ensayo PIM.....	130
Figura 69 – Resistencia a compresión y flexión del Nanosílice .....	131
Figura 70 – Resistencia a compresión y flexión del Superplastificante .....	132
Figura 71 - Curvas granulométricas del cemento, CV, HS, lodos sin calcinar y lodos calcinados. ....	133
Figura 72 - Análisis granulométrico láser de las partículas cementantes.....	134
Figura 73 – Porcentajes de la resistencia a compresión del mortero de referencia, que alcanzan los morteros con aditivos y adiciones. ....	135
Figura 74 – Resistencia a compresión y flexión de los neumáticos triturados .....	138
Figura 75 – Resistencia a compresión y flexión del plástico Alfatén .....	140
Figura 76 – Resistencia a compresión y flexión del plástico Alfafil .....	141
Figura 77 – Distribución de tamaños de poros (PIM) .....	143
Figura 78 – Resistencia a compresión y flexión del corcho .....	146
Figura 79– Distribución de tamaños de poros de mortero de referencia y con 18.5% de corcho. ....	146
Figura 80- Curvas granulométricas de los áridos reciclados .....	147
Figura 81– Porcentajes de la resistencia a compresión de los morteros de referencia, que alcanzan los morteros con LWA reciclados.....	148

Figura 82 – Porcentajes de densidad, que reducen los morteros con LWA, de los morteros de referencia.....	149
Figura 83 - Distribución dimensional de los poros de las muestras de morteros (PIM).....	150
Figura 84 – Sortividad secundaria Vs. Densidad .....	150
Figura 85 – Absorción de agua Vs. Raíz del tiempo (Sortividad) .....	151
Figura 86 – Estimación de resistencia a compresión para los porcentajes de sustitución estimados .....	151
Figura 87– Estimación de densidad para los porcentajes de sustitución estimados.....	152
Figura 88 – Resultados resistencia mecánica mortero durabilidad .....	152
Figura 89 – Resistencia a compresión y flexión de los dos tipos de arena .....	155
Figura 90- Granulometrías de los áridos no ligeros .....	156
Figura 91 – Resistencia a compresión y flexión de las fibras analizadas.....	159
Figura 92 - Esquema esfuerzo de compresión (izquierda) y diagrama tensión-deformación (derecha) [147] .....	160
Figura 93- Esquemas métodos obtención resistencia a tracción de una probeta .....	163
Figura 94- Diagrama esquemático del ensayo de sortividad. [20] .....	171
Figura 95- Tabla resistencia- Densidad por tipos de hormigón .....	178
Figura 96 – Relación resistencia-cantidad de cemento .....	179
Figura 97 – Resistencias a compresión a 7 días de los hormigones con fibras .....	179
Figura 98 – Relación resistencia – densidad, de hormigones con fibras.....	180
Figura 99 – Resistencia-Densidad de hormigones ligeros.....	180
Figura 100 – R. Compresión – dosificación áridos de los hormigones ligeros .....	181
Figura 101 – Evolución de la resistencia a compresión y módulo elástico en el tiempo.....	187
Figura 102 - Relación R. compresión–densidad de hormigones con árido plástico. ....	188
Figura 103 - Relación R. compresión–densidad de hormigones con árido de corcho. ....	188
Figura 104 – Gráfico de los resultados de roturas a compresión .....	189
Figura 105 – Gráfica densidad – resistencia de los hormigones .....	190
Figura 106 – Comparativa densidad – resistencia; estado del arte – ECO-HPC.....	190
Figura 107 - Valores de módulo de elasticidad- densidad de laboratorio y estimados.....	192
Figura 108 - Relación Módulo-Densidad de hormigones del estado del arte y ECO-HPC .....	193
Figura 109 – Relación Tracción –comp. comparados con datos estimados según FIB-Code 2010 .....	194
Figura 110 – Relación tracción–resistencia a compresión, estado del arte y ECO-HPC .....	195
Figura 111 - Evolución de la temperatura de fraguado (°C) para cada dosificación.....	196
Figura 112- Evolución de las retracciones totales para cada dosificación .....	197
Figura 113 – Distribución dimensional de los poros de las muestras.....	199
Figura 114 - Situación de los hormigones ensayados frente al estado del arte en la relación porosidad- resistencia a compresión. ....	200
Figura 115– Absorción de agua Inicial y secundaria Vs. Raíz del tiempo.....	202
Figura 116 – Sortividad secundaria en relación con la resistencia a compresión .....	203
Figura 117 - Estado del arte de penetración de agua a presión Vs. Resistencia a compresión. ....	205
Figura 118- Profundidad de carbonatación en el tiempo.....	208
Figura 119- Profundidad de carbonatación Vs. Resistencia a compresión .....	209
Figura 120 – Resultados medios de penetración de ion cloruro en hormigones .....	212
Figura 121 – Gráfica resultados compresión de pruebas industriales y hormigones de la fase V .....	244
Figura 122 – Sortividad- compresión pruebas industriales y laboratorio .....	245
Figura 123- Sortividad en función del tiempo de pruebas industriales y laboratorio .....	246



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Materiales y resistencias de las mezclas de distintos artículos científicos .....	29
Tabla 2 - Materiales y resistencias de las mezclas de distintos artículos científicos. ....	31
Tabla 3 - Toneladas de plástico consumidas anualmente .....	36
Tabla 4 - Tipos de plásticos y usos [119] .....	37
Tabla 5 - Propiedades de distintas pastas con plástico en la literatura .....	38
Tabla 6 - Relación $\alpha/cm$ y tamaño de las burbujas .....	50
Tabla 7 - Principales compuestos del cemento en el calor de hidratación .....	55
Tabla 8- Evolución de la resistencia a compresión de un hormigón normal [139] .....	55
Tabla 9- Condiciones de curado en los hormigones de los artículos seleccionados .....	56
Tabla 10- Proporciones de las mezclas de LWC (en $kg/m^3$ ) .....	61
Tabla 11 - Proporciones de las mezclas, granulometrías y resistencia a compresión de LWC. [13] .....	62
Tabla 12- Condiciones de curado en los hormigones de los artículos seleccionados .....	64
Tabla 13- Resistencias a tracción y compresión de los testigos experimentados. [101] .....	66
Tabla 14- Resistencias de los vínculos árido-mortero y árido-pasta. [101] .....	67
Tabla 15 - Composición aproximada de hormigones (kg) y densidades ( $kg/m^3$ ) de un metro cúbico de hormigón. [8] .....	70
Tabla 16- Detalles de los testigos de ensayo y proporciones de la mezcla. [15] .....	71
Tabla 17- Dosificación de LWC (en $kg/m^3$ ) [30] .....	74
Tabla 18- Proporciones de las mezclas de LWC [98] .....	75
Tabla 19- Ensayos de durabilidad realizados en más de un artículo citado .....	80
Tabla 20 - Dosificaciones para ensayo de sortividad [20] .....	82
Tabla 21 - Dosificación y características de hormigones convencionales y ligeros. [20] .....	84
Tabla 22- Permeabilidades con Porosímetro de mercurio .....	85
Tabla 23- Sustancias agresivas para el hormigón .....	87
Tabla 24 - Detalle de dosificación (por $m^3$ ) [18] .....	89
Tabla 25- Dosificación de los hormigones ( $kg/m^3$ ) [94] .....	91
Tabla 26- Dosificación de LWC con AACV y NC[28] .....	94
Tabla 27- Tabla de ensayos de caracterización de las materias primas .....	96
Tabla 28 - Granulometría de la arena .....	97
Tabla 29 - Dosificación inicial .....	97
Tabla 30 - Dosificación de hormigones de altas prestaciones en proporciones en peso .....	98
Tabla 31- Dosificación de hormigones de altas prestaciones con fibras en proporciones en peso del cemento .....	99
Tabla 32- Dosificación de hormigones ligeros en proporciones en peso y volumen del cemento .....	99
Tabla 33- Dosificación de hormigones ligeros con fibras en proporciones en peso y volumen del cemento .....	100
Tabla 34- Dosificación morteros con aditivos y adiciones .....	102
Tabla 35- Dosificación morteros con fibras .....	102
Tabla 36- Dosificación morteros con distintos áridos .....	102
Tabla 37 - Dosificación morteros para estudio de durabilidad .....	103
Tabla 38- Dosificaciones de los hormigones definitivos .....	103
Tabla 39 - Ensayos de resistencia mecánica a los hormigones definitivos .....	104
Tabla 40 - Ensayos de estabilidad dimensional a los hormigones definitivos .....	104
Tabla 41 - Ensayos de durabilidad a los hormigones definitivos .....	104
Tabla 42- Análisis estructural del cemento por difracción de rayos X de la parte cristalina .....	107
Tabla 43 - Resultados del ensayo de FRX .....	107
Tabla 44 - Análisis estructural de las CV por difracción de rayos X de la parte cristalina .....	112

Tabla 45 – Resultados del ensayo de FRX de las CV .....	113
Tabla 46 - Análisis estructural del HS por difracción de rayos X de la parte cristalina .....	117
Tabla 47 – Resultados del ensayo de FRX del HS .....	118
Tabla 48 - Análisis estructural del lodo sin calcinar por difracción de rayos X de la parte cristalina.....	123
Tabla 49 - Análisis estructural del lodo calcinado por difracción de rayos X de la parte cristalina .....	123
Tabla 50 – Resultados del ensayo de FRX del lodo sin calcinar.....	123
Tabla 51 – Resultados del ensayo de FRX del lodo calcinado .....	124
Tabla 52 – Propiedades del Ns.....	130
Tabla 53 – Resultados del ensayo PIM, resistencia y densidad .....	131
Tabla 54 – Propiedades del Sp. ....	132
Tabla 55 - Superficie específica de las partículas cementantes .....	135
Tabla 56 – Principales componentes de los neumáticos .....	137
Tabla 57 - Granulometría del neumático triturado.....	137
Tabla 58- Granulometría del PEBD .....	139
Tabla 59- Granulometría del PP.....	143
Tabla 60- Resultados de ensayos de compresión, PIM y densidad. ....	143
Tabla 61- Granulometría del corcho .....	145
Tabla 62 – Resultados del ensayo PIM, resistencia a compresión y densidad del mortero con 18.5% de corcho.....	145
Tabla 63 – Resultados ensayos de morteros con LWA .....	148
Tabla 64 – Datos de porosidad de ensayos de capilaridad y PIM.....	149
Tabla 65- Granulometría de la arena Tipo A .....	153
Tabla 66 - Granulometría de la arena Tipo B.....	154
Tabla 67 - Granulometría de la grava.....	155
Tabla 68 – Resultados ensayos de morteros con fibras.....	159
Tabla 69 – Consistencias y valores límite de asentamiento.[104] .....	167
Tabla 70 - Valores de consistencia mediante cono de Abrams .....	167
Tabla 71 – Resultados compresión y densidad de hormigones con áridos tradicionales sin fibras .....	176
Tabla 72 – Resultados compresión y densidad de hormigones con fibras.....	176
Tabla 73 – Resultados compresión y densidad de hormigones ligeros .....	177
Tabla 74 – Resultados compresión y densidad de hormigones ligeros con fibras .....	177
Tabla 75 – Resultados compresión 7, 28 y 90 días y densidad. ....	184
Tabla 76 – Resultados módulo elástico y tracción indirecta.....	184
Tabla 77 – Resultados de resistencia a compresión reales y estimados .....	186
Tabla 78 - Resultados del ensayo de PIM .....	198
Tabla 79 – Resultados de ensayo de capilaridad.....	200
Tabla 80 – Resultados ensayo sortividad .....	201
Tabla 81 – Resultados sortividad.....	201
Tabla 82 – Resultados de porosidad por PIM y capilaridad .....	203
Tabla 83 - Valores del ensayo de penetración de agua a presión, con los datos de resistencia a compresión y densidad.....	204
Tabla 84 – Datos del experimento de resistencia a la penetración de agua a presión .....	206
Tabla 85 – Resultados ensayo carbonatación acelerada .....	210
Tabla 86 – Resumen ensayos durabilidad categorizado .....	214
Tabla 87- Dosificaciones utilizadas en las pruebas industriales .....	235
Tabla 88 – Resultados ensayos densidad y compresión.....	244
Tabla 89 – Resultados ensayo sortividad hormigones pruebas industriales y laboratorio .....	245

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1 – Polipropileno (Izda.) y Corcho (Drcha.) utilizados para la investigación .....	20
Imagen 2 – Probetas pulidas de NC (Izda.) y LWC (Drcha.) .....	21
Imagen 3- Áridos finos (arriba) y gruesos (abajo) de escoria volcánica [34] .....	35
Imagen 4- Micrografía de luz mostrando cenoesferas puras (750×)[87] .....	43
Imagen 5 - Áridos gruesos de OPS con y sin fibra [51] .....	44
Imagen 6- Micrografías de gránulos de almidón de trigo (A), partículas angulares (B), cuentas esféricas (C), y cilindros extruidos (D). [86] .....	45
Imagen 7- Cilindros de hormigón con EPS que contienen granos de 1 mm, 2.5 mm y 6.3 mm respectivamente. [99] .....	63
Imagen 8- Árido poroso entrelazado con pasta de cemento por la interfase [23] .....	73
Imagen 9- Micrografía de microgrietas por retracción por secado propagada a través de una partícula de arcilla expandida [100] .....	77
Imagen 10- Elemento con ataque por carbonatación tras ensayo de fenolftalína [154] .....	89
Imagen 11- Imágenes de la zona interfacial alrededor del árido grueso convencional (izquierda) y ligero (derecha) (Nota: - Partículas de cemento no hidratadas) [1] .....	93
Imagen 12- Probetas de morteros dispuestos antes (imagen superior) y durante (inferior) las pruebas de rotura. ....	111
Imagen 13- Proceso de preparación de los áridos para fabricación de morteros .....	136
Imagen 14 - Micrografía a diferentes escalas del neumático .....	138
Imagen 15 – Morteros con Alfaten (Izda.) y Alfafil (Drcha.), dispuestos para las pruebas de resistencia a compresión. ....	139
Imagen 16 - Micrografía a diferentes escalas del PEBD .....	140
Imagen 17 - Micrografía a diferentes escalas del PP.....	142
Imagen 18– Morteros con corcho dispuestos para las pruebas de resistencia .....	144
Imagen 19 - Micrografía a diferentes escalas del Corcho .....	145
Imagen 20 - Micrografía a diferentes escalas de la arena Tipo B.....	154
Imagen 21- Micrografía a diferentes escalas de la grava.....	156
Imagen 22 - Imagen de las fibras de esparto sometidas a hormificación .....	157
Imagen 23 - Micrografía a diferentes escalas de las fibras de esparto .....	158
Imagen 24 - Micrografía a diferentes escalas de polivinilo .....	158
Imagen 25 - Ensayo de resistencia a compresión de testigo de hormigón .....	161
Imagen 26 - Ensayo de resistencia a compresión de testigo de hormigón en el momento de la rotura.....	162
Imagen 27 - Aparato de ensayos para obtención de resistencia a tracción en probetas de hormigón .....	163
Imagen 28 - Ensayo de doble punzonamiento.....	165
Imagen 29 - Cono de Abrams .....	168
Imagen 30 –Termopar, modelo RC-4 marca Elitech .....	169
Imagen 31 – Probeta prismática con las sondas térmicas .....	169
Imagen 32 – Detalle de la parte superior de dos probetas durante el ensayo con el comparador sobre ellas.....	170
Imagen 33 – Pobretas ensayadas tras rociar con fenolftaleína .....	173
Imagen 34 – Probetas ya ensayadas tras el rociado con nitrato de plata.....	174
Imagen 35 - Probetas preparadas para ensayo de cloruros .....	174
Imagen 37 – Imagen de los materiales, amasadora y moldes antes del amasado.....	182
Imagen 36 – Probetas cilíndricas en cubeta para curado en inmersión. ....	182
Imagen 38– Vertido del Ns.....	183
Imagen 39 – Vertido del agua.....	183
Imagen 40 – Proceso de amasado .....	183

Imagen 41 - Materiales.....	183
Imagen 42 - Imágenes de microscopio de la interfaz árido-pasta del ECO-HUL a los 28 días .	213
Imagen 43 – Fotografías de hormigones ECO-HPC .....	213
Imagen 44– Zonas de acopio de material.....	236
Imagen 45 – Dosificador, silos y sala de control.....	237
Imagen 46– Fabricación de vigas y losas durante las pruebas.....	238
Imagen 47 - Preparación y fabricación de probetas.....	239
Imagen 48- Amasado, carga y vertido .....	240
Imagen 49- Personal participante en las pruebas (HormiCruz S.L. y UPCT) .....	241
Imagen 50– Traslado de las vigas a laboratorio UPCT .....	242
Imagen 51– Traslado de las losas a laboratorio UPCT.....	243





## ANEXO II. PRUEBAS INDUSTRIALES

Las pruebas industriales consistieron en la fabricación de vigas, losas y probetas en unas instalaciones industriales por los medios tradicionalmente utilizados en el sector (silos, hormigonera, etc.).

Las pruebas se realizaron en la planta que HormiCruz S.L. tiene en La Palma (Cartagena), utilizando material suministrado por la empresa y con su maquinaria disponible.

Más tarde las piezas hormigonadas, una vez desencofradas, se trasladaron a los laboratorios de la UPCT donde se realizaron los ensayos que se detallan a continuación.

Para esta fase se fabricaron dos de los hormigones analizados en el presente trabajo, el HP 550 y el ECO-HPC 550 ya que eran los de más interés a nivel comercial y suponían una prueba representativa del trabajo realizado en la presente tesis.

Las dosificaciones utilizadas se muestran en la [Tabla 87](#), en ella apuntar que la cantidad de cemento del PI ECO-HPC 550 se varió debido al secado del árido de corcho por las condiciones ambientales con temperaturas superiores a los 30°C y soleamiento, que modificaban a las de laboratorio. Elevando la cantidad de agua se consiguió la misma trabajabilidad de laboratorio necesaria para el mezclado y vertido de las instalaciones industriales.

Tabla 87- Dosificaciones utilizadas en las pruebas industriales

MEZCLA DOSIFICACION		PI HPC 550		PI ECO-HPC 550	
		Kg/m <sup>3</sup>	L	Kg/m <sup>3</sup>	L
Componentes	Cemento	550,0	177,4	550,0	177,4
	Agua	160,0	160,0	182,5	182,5
	C.V.	130,0	59,1	130,0	59,1
	NanoSiO <sub>2</sub>	14,0	12,3	14,0	12,3
	Arena	1015,2	390,4	646,9	248,8
	Grava	507,6	195,2	142,3	54,7
	S.P.	11,0	10,5	11,0	10,5
	Alfafil			206,2	171,8
	Corcho			21,5	107,5

Reportaje fotográfico de las etapas de la fase industrial.

- Instalaciones y maquinaria
  - Acopios



Imagen 44– Zonas de acopio de material



o Instalaciones



Imagen 45 – Dosificador, silos y sala de control



○ Fabricación vigas y losas



Imagen 46– Fabricación de vigas y losas durante las pruebas



○ Hormigonado probetas



Imagen 47 - Preparación y fabricación de probetas



- Silos, amasado y hormigonado



Imagen 48- Amasado, carga y vertido

- Personal involucrado



Imagen 49- Personal participante en las pruebas (HormiCruz S.L. y UPCT)



- Transporte de vigas y losas a laboratorio de ensayo.



Imagen 50– Traslado de las vigas a laboratorio UPCT



Imagen 51– Traslado de las losas a laboratorio UPCT



- Ensayos
  - Compresión y densidad

Tabla 88 – Resultados ensayos densidad y compresión

MEZCLA	RESULTADOS ENSAYOS			
	Resistencia a Compresión a 7 días (MPa)	Resistencia a Compresión a 28 días (MPa)	Resistencia a Compresión a 90 días (MPa)	Densidad media kg/m³
PI HPC 550	71,5	80,4	87,2	2424,1
PI ECO-HPC 550	21,1	22,6	23,1	1800,5

Al comparar los resultados de las pruebas industriales con sus equivalentes de laboratorio se observa como la resistencia varía poco, en los HP, a 7 días alcanzan el mismo valor, a 28 días baja un 3.3% y a 90 un 10.1% en los ECO-HPC, las pruebas industriales descienden un 24.1% a 7 días, un 13.7% a 28 y un 23.5% a 90 días, en los hormigones ligeros hay que tener en cuenta que no solo se variaron las condiciones de amasado y curado sino también se aumentó ligeramente la cantidad de agua.

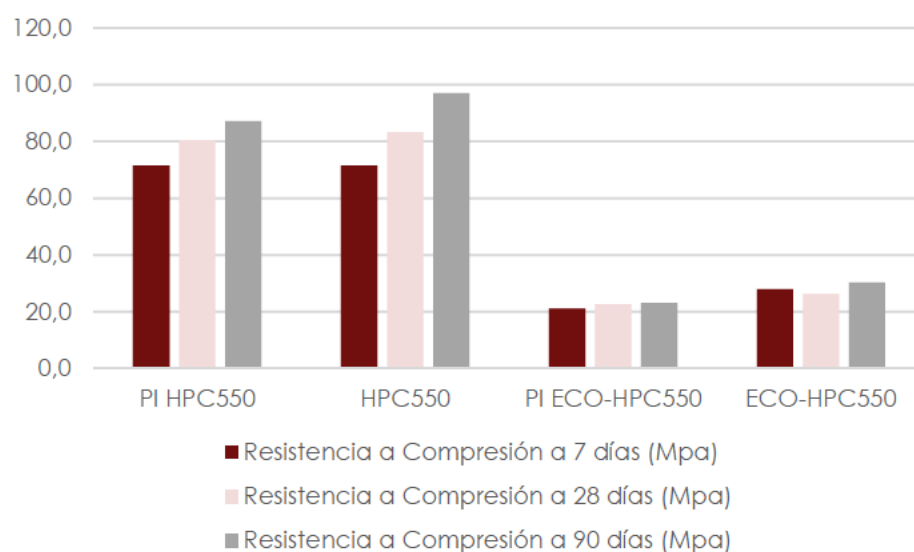


Figura 121 – Gráfica resultados compresión de pruebas industriales y hormigones de la fase V



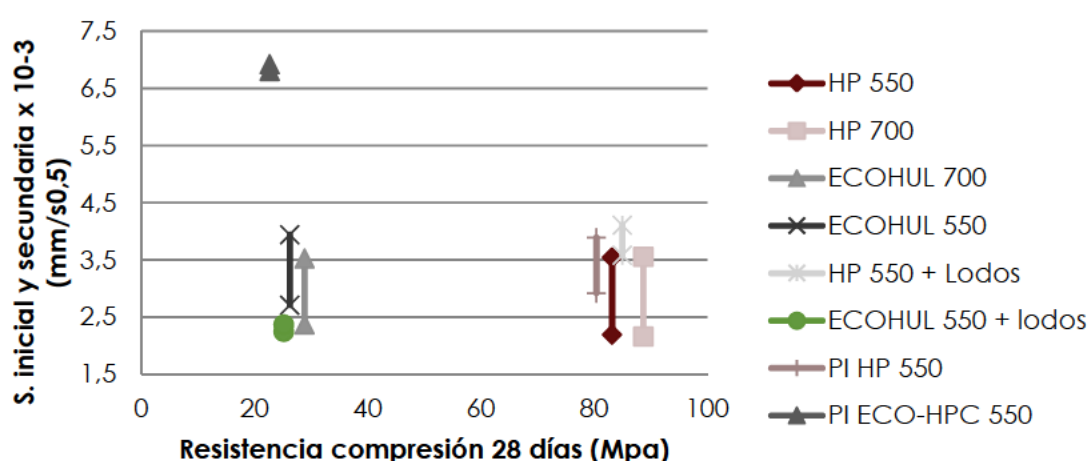
- Absorción por capilaridad.

Las muestras de los hormigones se sometieron a la prueba de absorción de agua por capilaridad.

Los resultados se comparan con los de los hormigones equivalentes de laboratorio. En la **Tabla 89** se muestran los resultados del ensayo, en la **Figura 122**, la sortividad-compresión de todos los hormigones y la **Figura 123** la sortividad en función del tiempo de los hormigones equivalentes laboratorio-pruebas industriales. Se observa como los resultados de esta prueba están directamente relacionados con los de la compresión, ya que los HP 550 son similares, aunque los resultados son inferiores en las pruebas industriales y la mejora de los hormigones de laboratorio en los hormigones ligeros es más destacada que en los HP. Esto puede ser debido a la cantidad de agua que se suministró de más en el PI ECO-HPC 550 y a que los LWA son más sensibles que los convencionales a las condiciones de amasado, vertido y curado, seguramente debido a una mayor dificultad para conseguir un correcto mezclado y a la mayor desecación del árido de corcho recuperado. Aun con la reducción en el resultado los datos siguen siendo válidos permitiendo el uso de este hormigón para el uso industrial.

**Tabla 89** – Resultados ensayo sortividad hormigones pruebas industriales y laboratorio

	HP 550 A	ECO-HPC 550	PI HP 550	PI ECO-HPC 550
<b>S Inicial (mm/s<sup>2</sup>)</b>	0,00354543	0,00394121	0,00389496	0,0068085
<b>S secundaria (mm/s<sup>2</sup>)</b>	0,002197035	0,00270958	0,0029203	0,00692514



**Figura 122** – Sortividad- compresión pruebas industriales y laboratorio

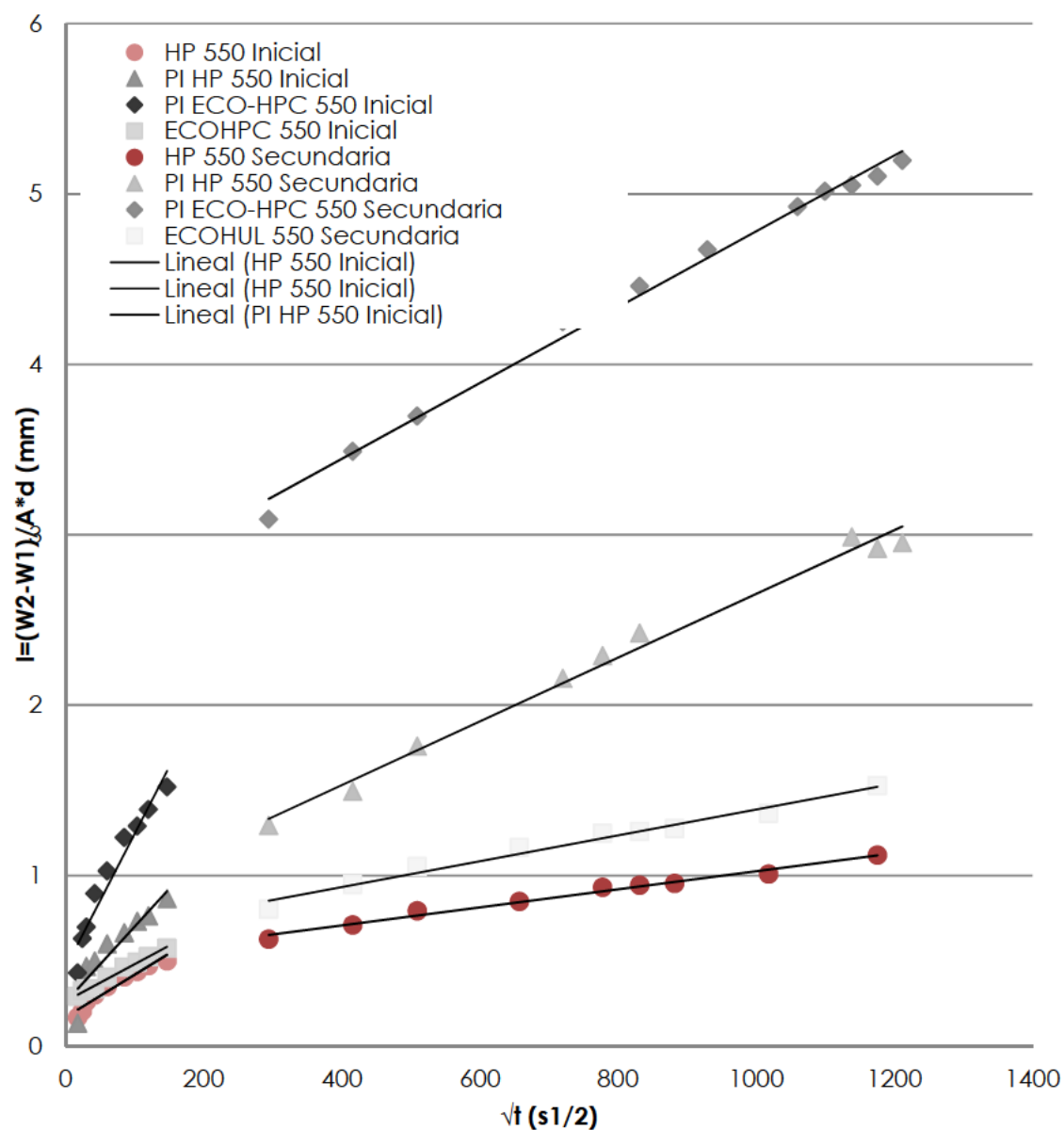


Figura 123- Sorptividad en función del tiempo de pruebas industriales y laboratorio